

ZUM FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSVERHALTEN  
VON BETON BEI INSTATIONÄREM UMGEBUNGSKLIMA

ARBEITSBERICHT II/1

Literatursichtung zum Kriechen von Beton  
bei erhöhter Temperatur bis 100 °C

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina  
Dipl.-Ing. H. Budelmann

Februar 1984

Untersuchung im Auftrag der DFG:

Schwerpunktprogramm "Stoffgesetze im konstruktiven Ingenieurbau"

Az.: Ko 204/34

## Inhaltsverzeichnis

### 1. EINLEITUNG UND ZIEL

### 2. EINFÜHRUNG

#### 2.1 Begriffe

#### 2.2 Phänomenologische Beschreibung von Kriechversuchen

### 3. EINFLÜSSE AUF DAS KRIECHEN BEI ERHÖHTER TEMPERATUR

#### 3.1 Werkstoffstruktur und -zustand

##### 3.1.1 Zementart und -menge, Mahlfeinheit

##### 3.1.2 Wasserzementwert

##### 3.1.3 Zuschlagart

##### 3.1.4 Zusatzmittel und -stoffe

##### 3.1.5 Belastungsalter

##### 3.1.6 Erhärtingsbedingungen vor Temperatur- und Lastbeanspruchung

##### 3.1.7 Bewertung und offene Fragen

#### 3.2 Lasteinwirkung: Höhe und Dauer

##### 3.2.1 Belastungsgrad

##### 3.2.2 Belastungsdauer

##### 3.2.3 Rückverformung nach Entlastung

##### 3.2.4 Bewertung und offene Fragen

#### 3.3 Thermisch-hygrische Umgebungsbedingungen

##### 3.3.1 Erhöhte Temperatur im stationären Zustand

##### 3.3.2 Einfluß der Feuchte

##### 3.3.3 Erhöhte Temperatur im instationären Zustand

##### 3.3.4 Bewertung und offene Fragen

### 4. FOLGERUNGEN FÜR ERFORDERLICHE KRIECHVERSUCHE

### 5. LITERATURVERZEICHNIS

## 1. EINLEITUNG UND ZIEL

Das Kriechen von Beton wird durch eine Vielzahl Parameter beeinflusst. Ein wesentlicher Parameter ist die Temperatur des Betons. Der Einfluß erhöhter Temperatur auf das Kriechen wurde in der Vergangenheit, neben der Erforschung des Baustoffverhaltens im Brandfall, vorrangig im Zuge der Reaktorforschung untersucht. Da Reaktordruckbehälter massige Bauteile darstellen, mußten die Versuchsbeanspruchungen so modelliert werden, daß sie den in solchen Bauteilen auftretenden Temperatur- und Feuchteverhältnissen entsprachen. Dementsprechend wurden Innenbereiche massiger Bauteile, in denen die Austrocknung infolge sehr langer Diffusionswege behindert ist, so simuliert, indem die Versuchskörper "versiegelt" erhöhter Temperatur ausgesetzt wurden. Bauteilaußenbereiche wurden hingegen nachgebildet, indem Versuchskörper "frei" austrocknen konnten. Kriechversuche hierzu wurden i.d.R. so durchgeführt, daß die zunächst unbelasteten Proben auf die gewünschte Temperatur homogen erwärmt und erst dann belastet wurden.

Neben dem Kernkraftwerksbau findet Beton zunehmend Verwendung für Bauwerke, die ebenfalls außergewöhnlichen klimatischen Betriebsbedingungen unterworfen sind, wie z.B. Meerwasserentsalzungsanlagen, Kläranlagen, Warmwasserbecken als Wärmespeicher und Kühltürme. Die thermisch und hygrisch bedingten Beanspruchungen des Betons unterscheiden sich nachdrücklich von denen in Reaktordruckgefäßen, da hier meist keine massigen Bauteilabmessungen vorliegen, die Temperaturen unterhalb von 100 °C bleiben und instationäre Betriebstemperaturen bei unterschiedlichen Betonfeuchtigkeiten bis zur Sättigungsfeuchte vorherrschen.

Hinsichtlich des Belastungszeitpunktes liegen in der Praxis üblicherweise folgende Bedingungen vor: Der Beton wird bei Normaltemperatur belastet oder vorgespannt und erst später erhöhter Temperatur ausgesetzt. In den wenigen Versuchen, die zu dieser Problematik durchgeführt wurden, wurde einhellig festgestellt,

daß bei Aufheizung unter Last große Kriechverformungen entstehen, die die im üblichen Kriechversuch, also Aufheizung vor Belastung, gemessenen deutlich übertreffen.

Aus der obigen Gegenüberstellung erkennt man, daß der für Reaktorbeton gewonnene Kenntnisstand über klimastationäres Kriechen nicht auf Klimabedingungen übertragbar ist, die vorwiegend thermisch und hygrisch instationär sind.

Das Ziel dieser Literatursichtung ist es deshalb, den derzeitigen Kenntnisstand über jene Parameter darzustellen, die das Kriechen bei erhöhter Temperatur im wesentlichen beeinflussen. Daraus soll abgeleitet werden, welche Parameter einer weitergehenden Klärung im Versuch bedürfen, um zum einen die keineswegs bereits befriedigenden Stoffgesetze zum Kriechen von versiegeltem oder trocknendem Beton unter stationären Klimabedingungen zutreffender formulieren zu können und zum anderen für instationäre Klimaeinwirkung Stoffgesetze zum Kriechen zu schaffen.

## 2. EINFÜHRUNG

### 2.1 Begriffe des Druckkriechens

$\epsilon$	Dehnung
$\epsilon_{el}$	elastische Dehnung
$\epsilon_k$	Kriechdehnung
$\epsilon_v$	verzögert-elastische Dehnung
$\epsilon_f$	Fließdehnung
$\epsilon_T$	Temperaturdehnung
$\sigma$	Spannung
$\sigma_k$	kriecherzeugende Spannung
$E$	Elastizitätsmodul
$B$	Festigkeit
$B_c$	Zylinderdruckfestigkeit
$T$	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\dot{T}$	Aufheizgeschwindigkeit
$t$	Zeit, Beobachtungszeitpunkt
$\tau$	Betonalter
$\tau_0$	Betonalter bei Belastung
$\tau_e$	Betonalter bei Entlastung
$\varphi$	Kriechzahl, $\epsilon_k/\epsilon_{el}$
$c_{sp}$	spez. Kriechmaß, $\epsilon_k/\sigma_k$

## 2.2 Phänomenologische Beschreibung des Druckkriechens von Beton

Ein dauernd belasteter Betonkörper erfährt eine mit der Zeit anwachsende Verformung, er kriecht. In Bild 1 ist das phänomenologische Ergebnis eines Kriechversuches unter konstanter Spannung und unter konstanter, atmosphärischer Temperatur während des betrachteten Zeitintervalls dargestellt.

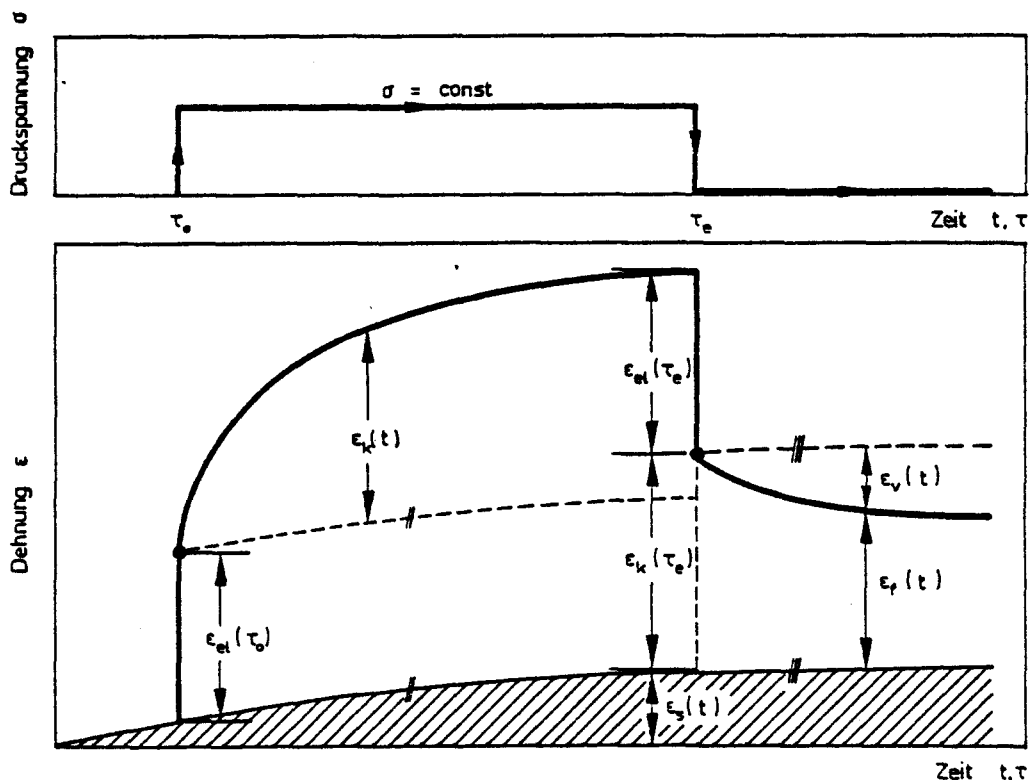


Bild 1 : Ablauf des Kriechens bei Normaltemperatur

Der Betonkörper wird im Alter  $\tau_0$  nach seiner Herstellung mit einer konstanten kriecherzeugenden Spannung  $\sigma_k$  beansprucht. Im Zeitraum  $t > \tau_0$  setzt sich die Kriechverformung  $\epsilon_k(t)$  zusammen aus:

$$\epsilon_k(t) = \epsilon_{ges}(t) - \epsilon_s(t) - \epsilon_{el}(\tau_0) \quad (1)$$

Diese Betrachtung enthält zwei Voraussetzungen:

1. Belastete und unbelastete Körper zeigen die gleichen Schwindverformungen.
2. Die elastische Dehnung wird als konstant im Belastungszeitraum angenommen.

Diese schon für Normaltemperatur nur bedingt zutreffenden Voraussetzungen verlieren für erhöhte Temperatur u.U. ihre Berechtigung. Dies soll aber in dieser vereinfachten Erläuterung keine weitere Berücksichtigung finden.

Ein Teil der Kriechverformung ist nach Entlastung reversibel. Damit setzt sich die Kriechverformung aus einem verzögert-elastischen Verformungsanteil  $\epsilon_v$  und der Fließverformung  $\epsilon_f$  zusammen

$$\epsilon_k(t) = \epsilon_v(t) + \epsilon_f(t) \quad (2)$$

Wird der Betonkörper, bevor er belastet wird, auf eine Temperatur  $T_1$  aufgeheizt, stellt sich der Ablauf der Verformungen gemäß Bild 2 dar.

Bei der Aufheizung ab dem Betonalter  $\tau_{T_0}$  entwickeln sich zunächst nur thermische Dehnungen  $\epsilon_T(t, T_1)$ , die zwar im Falle unversiegelten Betons bereits von Schwinddehnungen begleitet werden, hier aber bis zum Erreichen von  $T_1$  unberücksichtigt bleiben sollen. Der weitere Ablauf ist qualitativ mit dem in Bild 1 gezeigten identisch, zeigt aber neben Zeit- bzw. Altersabhängigkeit außer-

dem eine Abhängigkeit von der Temperatur  $T_1$ . Im Alter  $\tau_{Te} > \tau_e$  wird wieder auf Normaltemperatur abgekühlt.

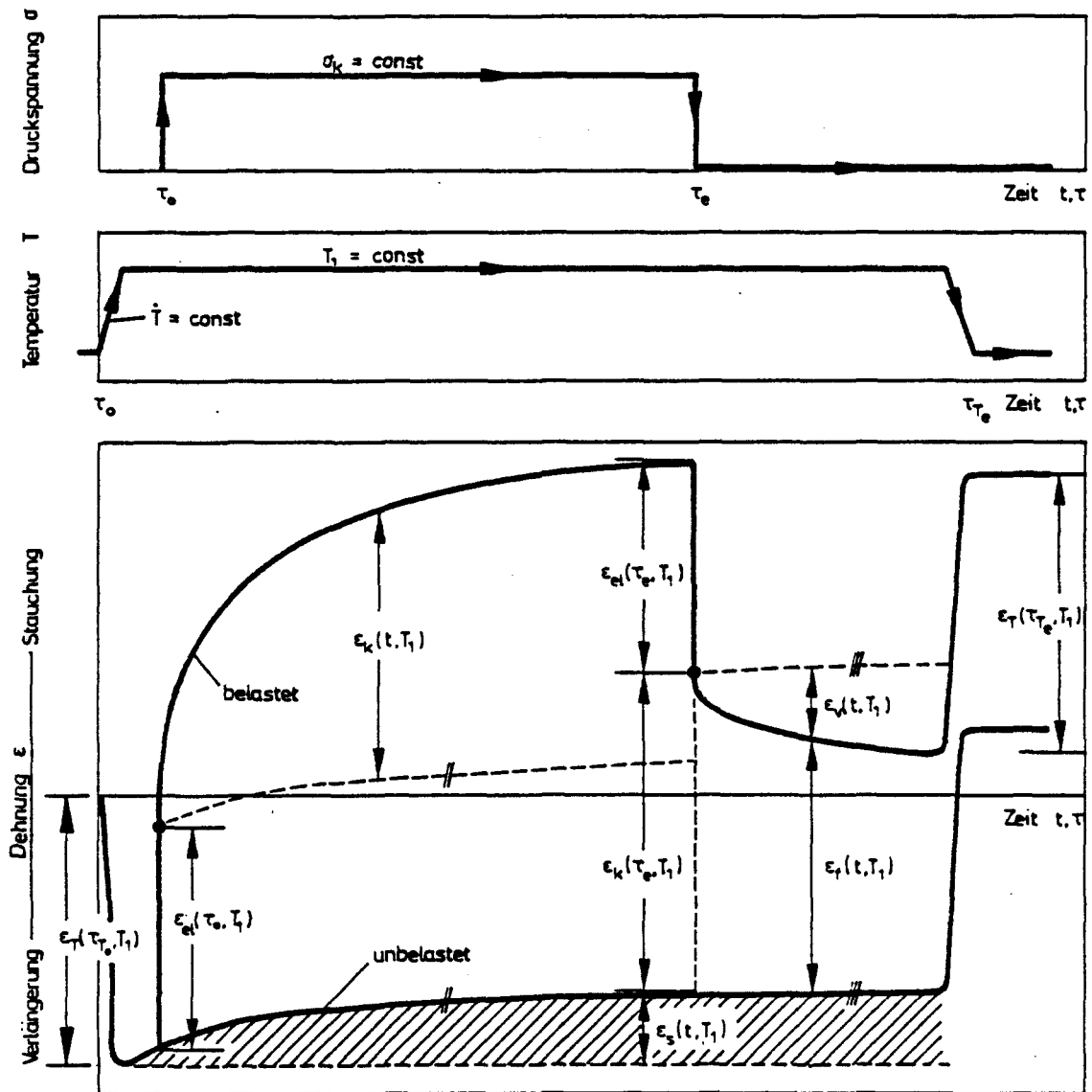


Bild 2 : Ablauf des Kriechens bei erhöhter, stationärer Temperatur

Liegen Aufheizung und Abkühlung außerhalb des Belastungszeitintervalls, findet der Kriechversuch bei "stationärer", also zeit-

lich unveränderter Temperatur statt. Dies entspricht dem üblichen Ablauf eines Kriechversuchs bei erhöhter Temperatur. In der Literatur wird ein derartiger Versuch mitunter auch als "isothermer" Kriechversuch bezeichnet.

Wird Beton zuerst belastet und anschließend aufgeheizt, entwickeln sich bereits während des Aufheizvorgangs Kriechverformungen. Bild 3 a zeigt qualitativ das phänomenologische Ergebnis eines Kriechversuches, in dem die Aufheizung direkt nach der Belastung im Alter  $\tau_0 = \tau_{T0}$  erfolgt. Anders als im Kriechversuch bei stationär einwirkender Temperatur ist die Kriechverformung nicht direkt anschaulich ablesbar, sondern muß zunächst um die thermische Dehnung  $\epsilon_T$  eines unbelasteten Probekörpers korrigiert werden:

$$\epsilon_k(t) = \epsilon_{ges}(t) - \epsilon_s(t) - \epsilon_{el}(\tau_0) + \epsilon_T(t) \quad (3)$$

Die Kriechdehnung  $\epsilon_k(t)$  ist in Bild 3 b dargestellt. Vergleichend ist diejenige Kriechverformung gestrichelt eingezeichnet, die sich, qualitativ beurteilt, in einem isothermen Kriechversuch mit der gleichen Temperatur  $T_1$  eingestellt hätte. Dies soll verdeutlichen, daß bei Aufheizung unter Last deutlich eine höhere Kriechverformung entsteht, als wenn die Belastung nach der Aufheizung vorgenommen wird.

Kriechversuche, in denen die Aufheizung unter Last erfolgt, werden üblicherweise als solche mit "instationärer" Temperatureinwirkung bezeichnet. Dabei ist es gleichgültig, ob die Temperatur dann von gleichbleibender Höhe oder zyklisch veränderlich ist. Analog zum isothermen Kriechen ist hier auch die Bezeichnung "nichtisotherm" möglich. Die folgende Literatursichtung bedient sich der Gepflogenheit, zwischen "stationärer" und "instationärer" Temperatureinwirkung zu unterscheiden.



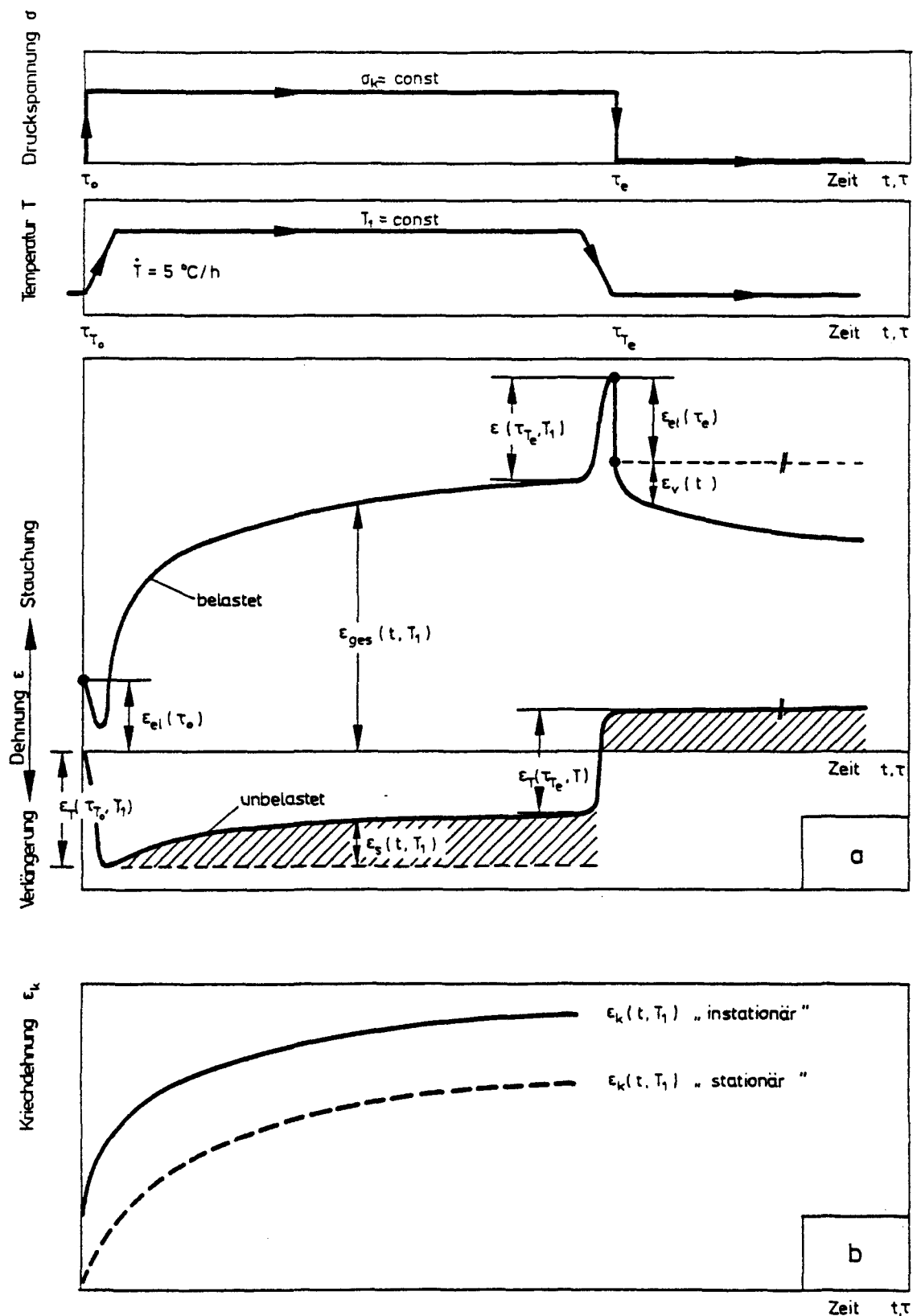


Bild 3 : Kriechen bei erhöhter, instationärer Temperatur  
a) Ablauf, b) Kriechverformung

### 3. EINFLÜSSE AUF DAS KRIECHEN BEI ERHÖHTER TEMPERATUR

#### 3.1 Werkstoffstruktur und -zustand

##### **3.1.1 Zementart und -menge, Mahlfeinheit**

Die Kriechverformungen von Beton finden i.w. im Zementstein statt. Denn trotz der Spannungskonzentrationen auf die Zuschläge zeigen die natürlichen Zuschlagstoffe des Normalbetons im Bereich der Gebrauchsspannungen kaum Kriechen. Die mit zunehmendem Belastungsgrad beobachtete Nichtlinearität des Kriechens und auch die teilweise Irreversibilität ist sicher auch durch Mikrorißbildung verursacht.

Bereits in frühen Versuchen für übliche atmosphärische Klimabedingungen wurde festgestellt, daß die Zementart keinen bedeutenden Einfluß auf die Kriechverformungen ausübt /56, 35, 54/. Daß in vergleichenden Untersuchungen an Betonen gleichen Belastungsalters aus unterschiedlichen Zementen dennoch größere Kriechverformungen für Betone aus niedrigfesten bzw. langsam erhärtenden Zementen festgestellt wurden, läßt sich auf deren geringeren Hydratationsgrad zum Belastungszeitpunkt zurückführen. Erhöhte Temperaturen unterhalb von 100 °C, die im Falle einer ausreichenden Feuchthaltung des Betons ja hydrationsbeschleunigend wirken können, bauen den Hydratationsgradunterschied rasch ab. Dem Parameter Zementart wird also nur eine recht geringe Bedeutung zukommen. Systematische Untersuchungen hierzu liegen allerdings nicht vor.

Die Zementmenge übt hingegen deutlichere Wirkungen auf die Betonkriechverformungen aus. Aus frühen Untersuchungen für Normaltemperatur schloß Wagner /87/, daß zwischen den Kriechverformungen eines Betons und seinem Zementleimgehalt Proportionalität herrscht. Neville /55/ gibt hingegen für das Verhältnis der Kriechverformungen eines Betons zu denen reinen Zementsteins folgenden Zusammenhang an:

$$\log \frac{\epsilon_{k,ZSt}}{\epsilon_{k,B}} = \alpha \cdot \log \frac{1}{1 - \frac{V_G}{V_{ges}}} \quad (4)$$

Das Verhältnis  $V_G/V_{ges}$  gibt den Anteil des Zuschlags am Betonvolumen an. Der Faktor  $\alpha$  berücksichtigt den E-Modul des Zuschlags und die Entwicklung des E-Moduls des Betons.

Die experimentelle Isolierung des Parameters Zementleimmenge bereitete stets Probleme, da z.B. eine Verringerung der Zementmenge einen erhöhten Wasseranspruch zur Erhaltung einer ausreichenden Frischbetonverarbeitbarkeit erfordert. Somit wird gleichzeitig der Wasserzementwert erhöht. Das Verhältnis Zementleim/Zuschlag wird aber dabei infolge der erhöhten Wasserzugabe nur in engen Grenzen erhöht. Eine sinnvolle Variierung der Zementleimmenge ohne gleichzeitig an sich wesentlichere Parameter wie z.B. den Wasserzementwert deutlich zu verändern, ist daher kaum möglich. Wohl auch aus diesem Grund liegen Untersuchungsergebnisse zum Einfluß der Zementleimmenge für erhöhte Temperaturen nicht vor. Ein dahingehender Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Autoren ist aus den genannten Gründen wenig aufschlußreich.

Die Mahlfeinheit des Zementes beeinflusst die Betonkriechverformungen hauptsächlich indirekt über den Hydratationsgrad im Belastungsalter. Widersprüchliche Versuchsergebnisse hierzu erklärt Neville /56/ mit unterschiedlichem Gipsgehalt der Zemente bzw. dessen Verfügbarkeit in jungem Betonalter und den daraus folgenden Veränderungen der Gelstruktur. Übereinstimmend wurde festgestellt, daß der Einfluß der Mahlfeinheit nicht ausgeprägt ist und mit dem Belastungsalter und der Belastungszeit rasch abnimmt /12/. Erhöhte Temperaturen dürften diese Tendenz verstärken.

### 3.1.2 Wasserzementwert

Mit steigendem Wasserzementwert nehmen die Kriechverformungen von Beton zu. In einigen Untersuchungen wurde das jedoch nicht

festgestellt /55/. Der Grund liegt vermutlich darin, daß zwar ein konstanter Beanspruchungsgrad, bezogen auf die Festigkeit bei Belastungsbeginn, gewählt wurde, der Tatsache aber, daß Betone mit höherem W/Z-Wert eine verstärkte Nacherhärtung aufweisen, nicht hinreichend Rechnung getragen wurde. Daraus resultiert eine Abnahme des effektiven Beanspruchungsgrades während des Versuchs und somit eine Verringerung der Kriechverformungen.

Bezogen auf das spezifische Kriechmaß ist hingegen aus einer Vielzahl von Versuchen bei Normaltemperatur /87/ die in Bild 4 dargestellte Tendenz feststellbar. Dargestellt ist die Kriechzahl  $\varphi$ , bezogen auf einen W/Z-Wert von 0,65. Unter der Annahme einer Proportionalität zwischen Kriechverformung und Zementleimgehalt wurden die Versuchsergebnisse auf einen einheitlichen Zementleimgehalt reduziert. Lorman /41/ nimmt für die Abhängigkeit zwischen Kriechen und Wasserzementwert einen quadratischen Zusammenhang der Form

$$m = k \cdot \left(\frac{W}{Z}\right)^2 \quad (5)$$

an, der wohl am ehesten den wahren Verhältnissen entspricht und in modifizierter Form Eingang in Rechenansätze fand, die auch Temperaturwirkungen umfassen /11/.

Über den Zusammenhang zwischen erhöhten Temperaturen und dem Einfluß des Wasserzementwertes auf das Kriechen liegen keine Versuchsergebnisse vor. Wegen der Abhängigkeit der Porosität des Zementsteins vom W/Z-Wert /60/, die ja ihrerseits von Bedeutung für den Feuchtehaushalt des Betons ist, sollte der Parameter W/Z-Wert besonders im Falle erhöhter Temperaturen Berücksichtigung finden.

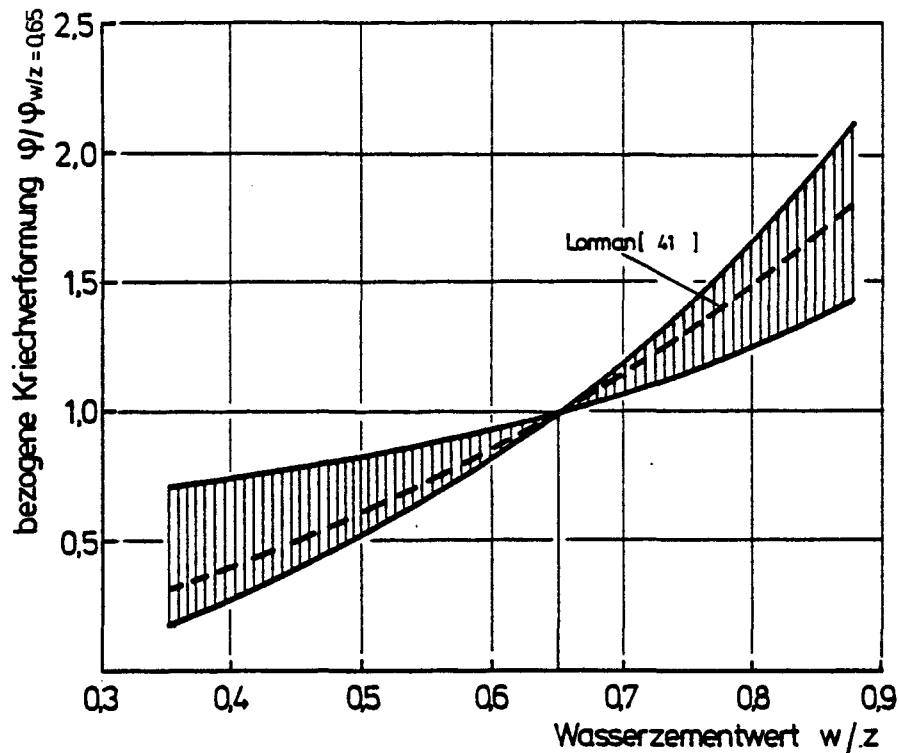


Bild 4 : Einfluß des W/Z-Wertes auf das Kriechen von Beton bei Normaltemperatur, nach [ 87 ]

### 3.1.3 Zuschlagart

Die Zuschlagkörner werden bei einer Druckbeanspruchung nur elastisch verformt. Dennoch haben sie Anteil am Betonkriechen, da sie aufgrund von Verträglichkeitsbedingungen den inneren Spannungszustand beeinflussen.

Die das Kriechen von Beton beeinflussenden Eigenschaften des Zuschlags sind neben der Stoffraummenge insbesondere der E-Modul, die Porosität und das Sorptionsvermögen. Aufgrund der Abhängigkeit dieser Faktoren voneinander ist ihr Einzeleinfluß auf die Kriechverformungen nicht ermittelbar, bzw. nicht als Funktion einer Abhängigen ausdrückbar.

In /47/ nimmt McDonald umgekehrte Proportionalität zwischen den Kriechverformungen von Beton und seinem E-Modul auch für erhöhte Temperaturen bis ca. 70 °C an. In seinen Versuchen zeigen versiegelte Kriechkörper aus Kalksteinbeton sowohl bei 20 °C als auch bei 70 °C höhere Kriechverformungen als solche aus vergleichbar zusammengesetztem Quarzkiesbeton (s. Bild 5).

Werden hingegen die Kriechverformungen bei 70 °C auf die Werte bei 20 °C bezogen, so weist Quarzkiesbeton eine stärkere Temperaturabhängigkeit als Kalkkiesbeton auf. In Bild 6 ist dies für die Ergebnisse von McDonald sowie für Versuche von Aschl /6/ an ähnlich zusammengesetzten Betonen dargestellt. Daß die Werte von Aschl sehr deutlich über jenen von McDonald liegen, ist vermutlich auf eine nicht dampfdichte Versiegelung zurückzuführen, so daß Wasseraustritt aus den Proben möglich war. Aschl wies an anderer Stelle darauf hin. Somit ist wahrscheinlich, daß Aschls Werte Anteile aus Trocknungskriechen und Schwinden enthalten. Dennoch ist auch hier die beschriebene Tendenz erkennbar.

Als Ursache für die Temperaturabhängigkeit des Kriechens vom Zuschlagstofftyp wird häufig angegeben, daß die Unterschiede im thermischen Dehnverhalten zwischen feuchtem Zementstein und den Zuschlägen zu zusätzlichen Gefügespannungen und Mikrorissen führen. Diese Wirkungen überlagern sich mit den kriecherzeugenden Spannungen und den Gefügespannungen infolge E-Modulunterschiede und erhöhen so das Kriechen. In diesem Fall sollte aber Quarzkies geringere temperaturbezogene Kriecherhöhungen bewirken als Kalkstein. Die Wärmedehnzahl von Kalkstein ist nämlich deutlich kleiner als die von feuchtem Zementstein und Quarzkies, die etwa

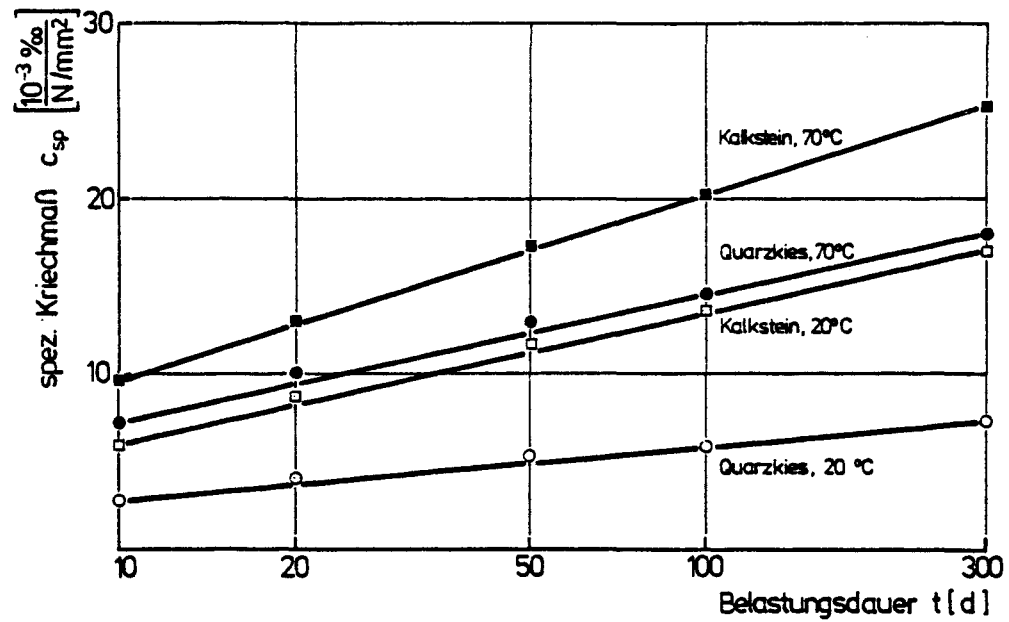


Bild 5 : Einfluß der Zuschlagstoffe auf das Betonkriechen bei erhöhten Temperaturen; nach [ 47 ]

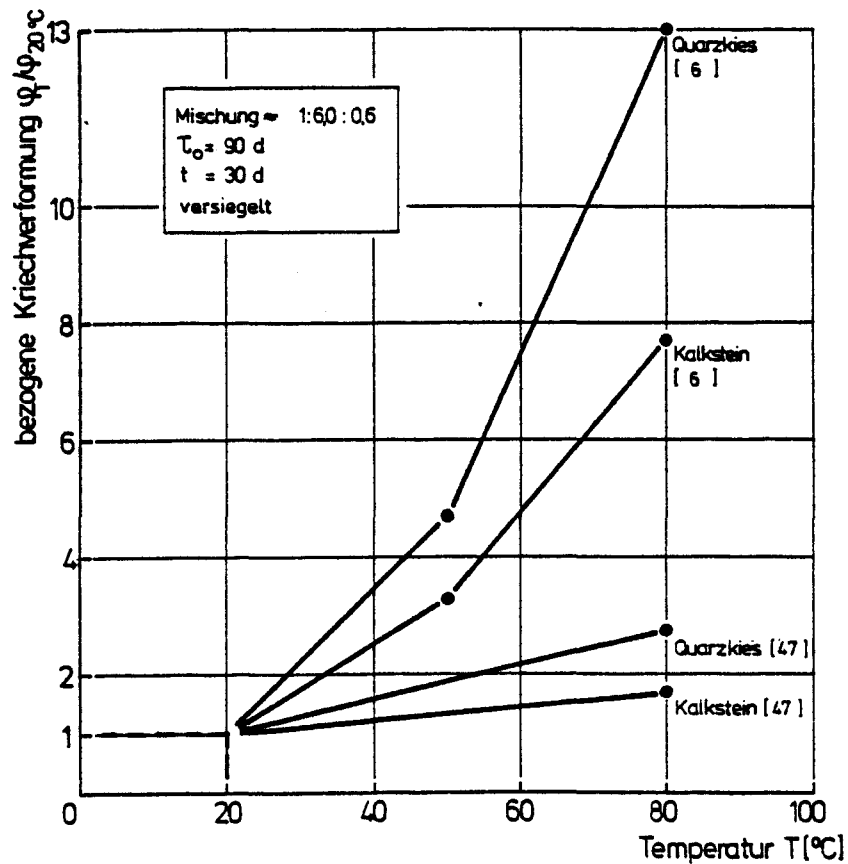


Bild 6 : Einfluß der Zuschlagstoffe auf die Betonkriecherhöhung bei erhöhten Temperaturen; nach [ 6, 47 ]

von gleicher Größenordnung sind. Diese Erklärung kann somit für den beobachteten Effekt kaum allein zutreffend sein.

### 3.1.4 Zusatzmittel und -stoffe

Über diesen Bereich liegen bereits für Normaltemperatur vergleichsweise wenige Versuchsergebnisse vor. Durch die Zugabe von Zusatzmitteln werden zwangsläufig eine Reihe kriecheinflussender Parameter verändert, wie z.B. Konsistenz, Bindemittelgehalt, zeitliche Festigkeitsentwicklung, Schwindverhalten, Luftporengehalt. Dies gilt in eingeschränktem Maße auch für Zusatzstoffe. Kenntnisse über den Einfluß von Betonzusätzen bei erhöhter Temperatur liegen nicht vor. Es ist jedoch bekannt, daß das Kriechen von Beton bei Normaltemperatur durch Traßzugaben nicht wesentlich beeinflußt wird /71/ und daß durch die Zugabe von Flugasche eine Verringerung der Kriechverformungen erreicht werden kann /25/.

In einigen Untersuchungen wurde außerdem festgestellt, daß durch die Zugabe von Flugasche Entfestigungen des Zementsteins infolge erhöhter Temperatur durch Zementstein-Zuschlagreaktionen ausgeglichen werden können /80/ bzw. Festigkeitszunahmen erzielt werden können /51/. Seeberger /80/ hat umfangreiche Untersuchungen zum Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten sowie zur Porenstruktur verschiedener Betone unter gleichzeitiger Temperatur- und Feuchtebeanspruchung durchgeführt. Er stellte fest, daß Flugaschezugabe die Temperaturbeständigkeit von Beton mit kalzischen Zuschlägen deutlich verbessert (s. Bild 7). Ob eine Flugaschezugabe das Betonkriechen bei erhöhter Temperatur verändert, ist ungeklärt.



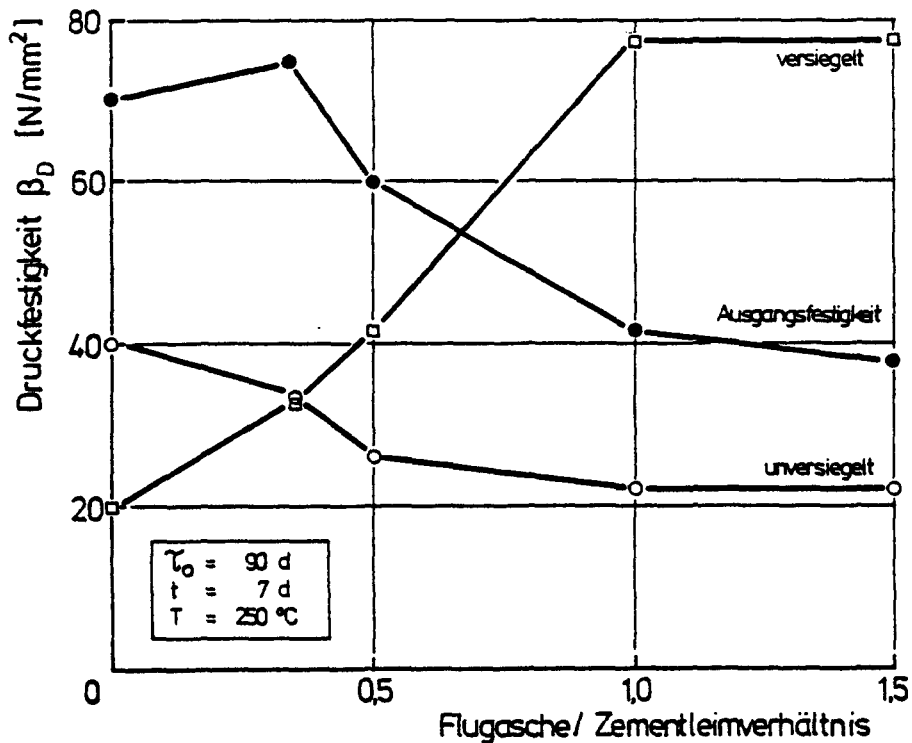


Bild 7 : Einfluß des FA/Z - Verhältnisses auf die Druckfestigkeit von temperiertem Kalksteinbeton; nach [ 80 ]

### 3.1.5. Belastungsalter

Der Einfluß des Belastungsalters nimmt mit zunehmender Temperatur ab /13, 81, 91, 83, 40, 3/

In Bild 8 ist die zeitliche Entwicklung der Kriechverformungen für unterschiedliche Belastungsalter nach Komendant /40/ dargestellt. Die Ergebnisse gelten für versiegelten Beton, der etwa 5 Tage vor der Belastung stufenweise auf die Versuchstemperatur aufgeheizt wurde. Es ist deutlich erkennbar, daß für den 28 d alten Beton, bezogen auf das Belastungsalter 270 d, bei Normaltemperatur innerhalb einer Belastungsdauer von ca. 100 d etwa 1,35-fache Kriechverformungen entstehen. Bei 71 °C liegt jedoch kein spürbarer Einfluß mehr vor. Zudem scheint sich das Belastungsalter nur während der ersten ca. 90 d der Belastung auszuwirken. Die in Bild 9 dargestellte Abhängigkeit der Kriechzahl vom Belastungsalter nach 90-tägiger Belastung (Komendant /40/ und Wölfel /91/) zeigt, daß ab dem Belastungsalter 90 d auch für Normaltemperatur kein deutlicher Einfluß mehr vorliegt.

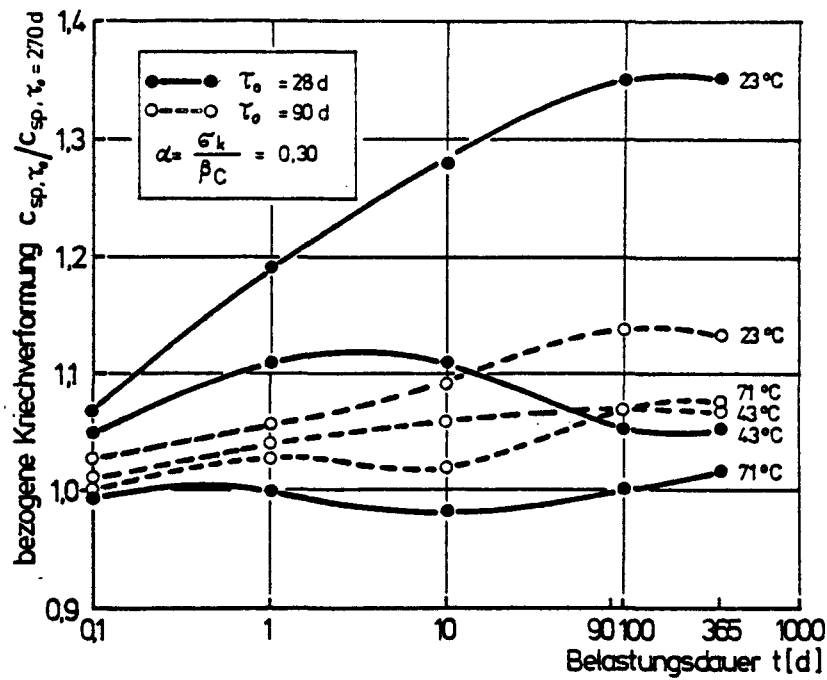


Bild 8 : Einfluß des Belastungsalters (bezogen auf  $\tau_0 = 270 d$ ) auf den Kriechverlauf versiegelten Betons bei erhöhten Temperaturen; nach [40]

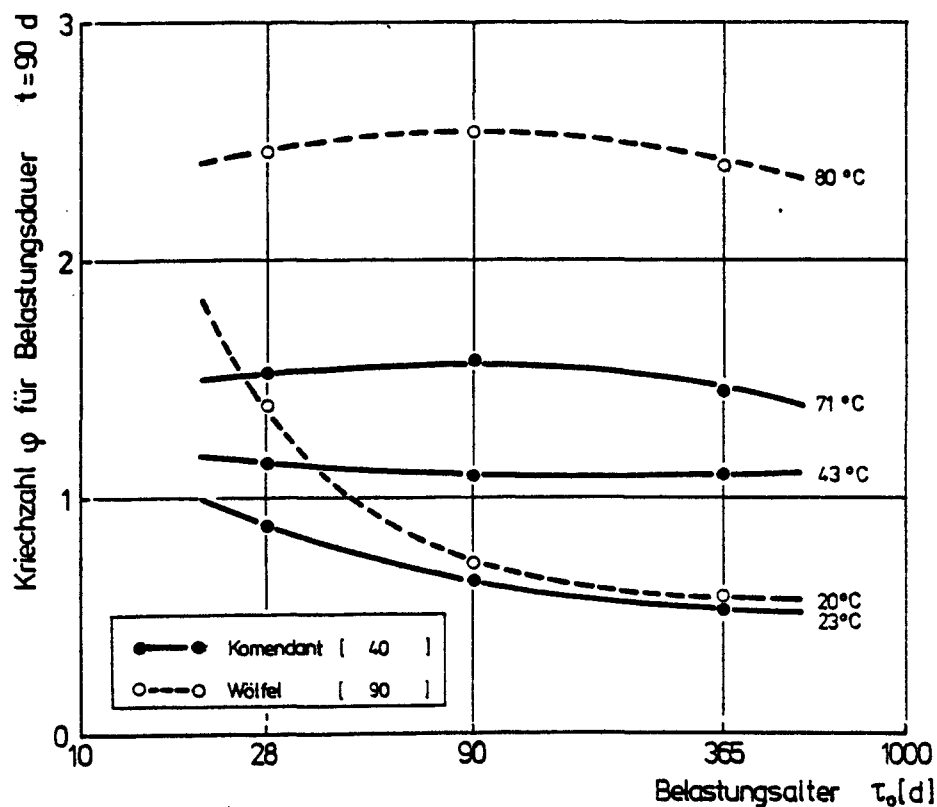


Bild 9 : Einfluß des Belastungsalters auf die Kriechzahl  $\varphi$  (Belastungsdauer  $t = 90 d$ ) versiegelten Betons bei erhöhten Temperaturen

Sofern Versuchskörper während des Versuchs austrocknen können, gewinnen die Parameter Probekörpergeometrie, Ausgangsfeuchte und Zeit im aufgeheizten Zustand vor der Belastung stark an Bedeutung. Damit werden vergleichende Darstellungen des Einflusses des Belastungsalters problematisch. Grundsätzlich verliert aber auch hier das Belastungsalter mit steigender Temperatur an Bedeutung.

Zur Frage, inwiefern der Einfluß des Belastungsalters von den Bedingungen "versiegelt" und "trocknend" abhängt, gibt eine Untersuchung von Niyogi /59/ Auskunft. Er untersuchte das Kriechen von Betonproben gleicher Geometrie und Ausgangsfeuchte unter den o.g. Umgebungsbedingungen bei Variation des Belastungsalters von 7 d bis 120 d bei 20 °C. Bild 10 zeigt die Kriechzahl für die Gesamtkriechverformungen nach 47 d Belastungsdauer des unversiegelten Progekörpers, sowie deren Anteile Grundkriechen und Trocknungskriechen. Interessant ist seine Beobachtung, daß die Grundkriechzahl mit zunehmendem Belastungsalter ansteigt, bei  $\tau_0 = 15$  d ein Maximum erreicht und dann abfällt! Das Trocknungskriechen zeigt hingegen die erwartete stetig fallende Tendenz bei zunehmendem Belastungsalter. Den Anstieg des Basiskriechens mit dem Belastungsalter für junge Probekörper erklärt Niyogi mit der Zunahme des im Zementgel adsorbierten, kriechverursachenden Wassers mit wachsendem Hydratationsgrad. Zu einem bestimmten Zeitpunkt sei dann die Geloberfläche so groß geworden, daß wegen der nur begrenzt verfügbaren Wassermenge eine Umlagerung des adsorbierten Wassers, verbunden mit einer Schichtdickenverringering, stattfände, die das Kriechpotential mit zunehmendem Alter verringere.

Entsprechende Versuche bei erhöhter Temperatur liegen nicht vor. Es kann jedoch vermutet werden, die Gültigkeit von Niyogi's Erklärung vorausgesetzt, daß hydratationsbeschleunigende, erhöhte Temperaturen diese Vorgänge in ein noch früheres Betonalter verschieben. Damit werden sie für das Kriechen bei erhöhten Temperaturen bedeutungslos. Tatsächlich bestätigen ja auch die Ergebnisse von Komendant und Wölfel, daß bereits für Belastungsalter

zwischen 28 d und 90 d deutlicher Einfluß des Belastungsalters nicht mehr erkennbar ist.

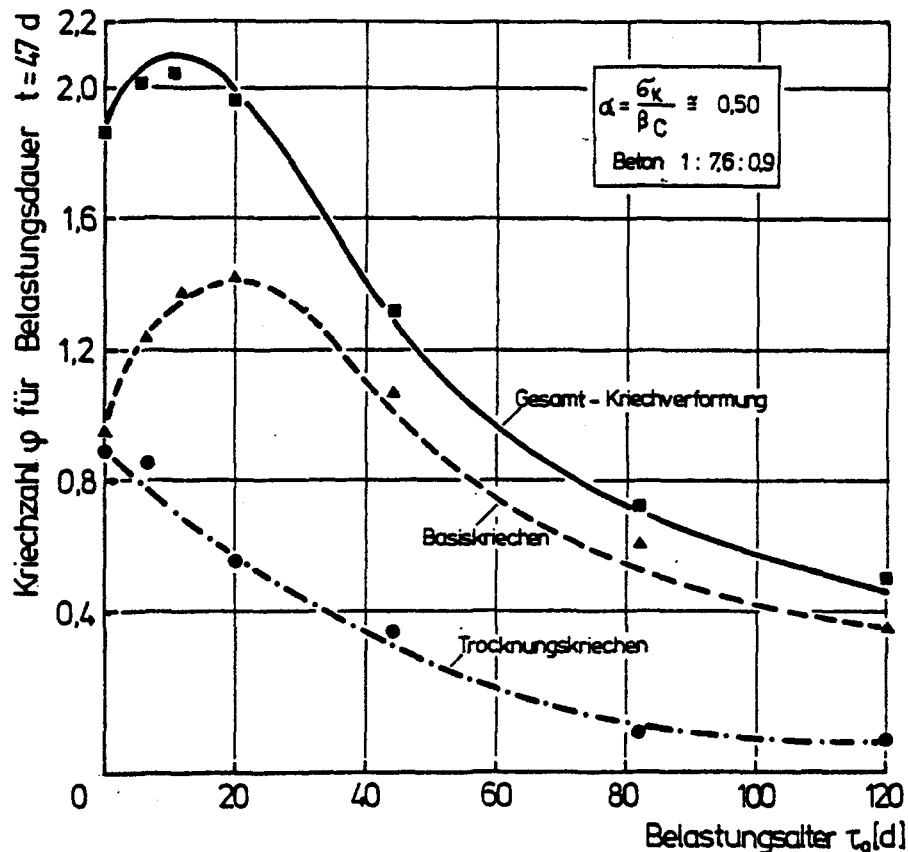


Bild 10 : Einfluß des Belastungsalters auf das Grund- und Trocknungskriechen von Beton bei 20°C; nach [ 59 ]

Interessant sind in diesem Zusammenhang auch die Ergebnisse von Nasser und Neville /53/, die das Temperaturkriechen 50-jährigen Betons mit dem von einjährigem verglichen. Sie stellten fest, daß 50-jähriger Beton nach 14 Tagen Wasserlagerung ein vergleichbares Kriechverhalten zeigt wie einjähriger, unter Wasser gelagerter Beton. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, daß das Kriechen von Beton bei erhöhten Temperaturen kaum vom Hydratationsgrad abhängig sein kann, vorausgesetzt, er ist nicht mehr sehr jung.

Vielmehr scheint es i.w. durch den Feuchtezustand des Zementgels und die temperaturabhängige Mobilität der adsorbierten Wasserfilme des Gels geprägt zu sein.

### **3.1.6 Einfluß der Erhärtingsbedingungen vor Temperatur- und Lastbeanspruchungen**

Die Temperatur- und Feuchtebedingungen bei der Reifung des Betons sind von Bedeutung für dessen späteres Kriechverhalten auch bei erhöhter Temperatur. Die Feuchtebedingungen beeinflussen den Hydratationsgrad und die Ausgangsfeuchte bei Belastung. Der Parameter Ausgangsfeuchte findet bei der Betrachtung der Feuchteverhältnisse beim Kriechvorgang Berücksichtigung und der Hydratationsgrad im Zusammenhang mit dem Belastungsalter und dem Belastungsgrad.

Eventuellen Temperaturerhöhungen während der Vorlagerungszeit (Reifung) und damit auch dem Zeitraum der Betonaufheizung vor dem Aufbringen der kriecherzeugenden Beanspruchung sollte besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Neville /53/ hat an einjährigem Beton festgestellt, daß Proben, die seit der Herstellung bei 20 °C unter Wasser lagerten, deutlich höhere Kriechverformungen zeigten als Proben, die während dieses Jahres bereits bei der späteren Versuchstemperatur wassergelagert wurden (s. Bild 11). Der Autor nimmt an, daß bei der erhöhten Temperatur trotz Feuchtlagerung der Anteil des adsorbierten Wassers gegenüber der Lagerung bei 20 °C verringert wird, was zu geringeren Kriechverformungen führt. In /32/ wird aus Nevilles Ergebnissen ein Abminderungsfaktor abgeleitet, der den Zeitablauf des kriechmindernden Einflusses von Temperierungen bei der Vorlagerung versiegelten Betons berücksichtigen soll. Die Belegung dieses Ansatzes mit Versuchswerten ist allerdings sehr gering. Auf eine weitergehende Darstellung wird daher verzichtet.

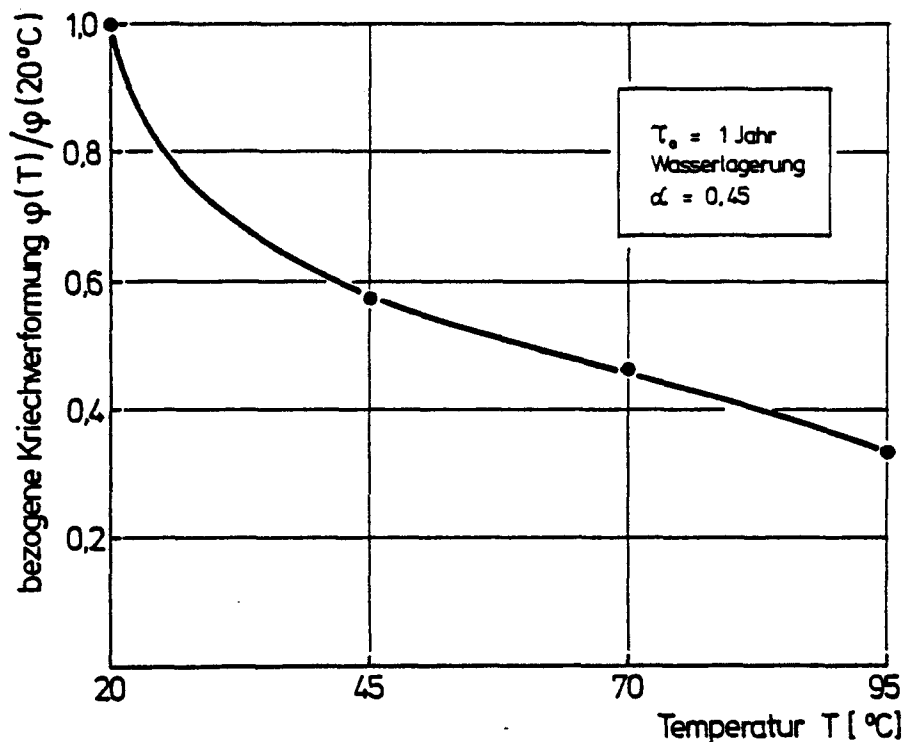


Bild 11 : Vergleich der Kriechzahlen von Beton nach Vorlagerung bei Versuchstemperatur  $T$  [ $\varphi(T)$ ] und bei  $20^\circ\text{C}$  [ $\varphi(20^\circ\text{C})$ ] nach einer Belastungsdauer von 225 d; nach [ 53 ]

Geymayer hat in einer vergleichenden Untersuchung /23/ der Ergebnisse von Kriechversuchen bei erhöhter Temperatur an sowohl versiegelten Proben /53, 52, 84, 9, 21/ als auch unversiegelten Proben /84, 34, 42/ eine interessante Feststellung gemacht. In allen Versuchen, in denen ein Kriechverformungsmaximum bei ca.  $70^\circ\text{C}$  ermittelt wurde, hatte die Aufheizung ca. 14 Tage vor der Belastung stattgefunden. Trat kein Maximum auf, war die Belastung innerhalb von 24 Stunden nach der Aufheizung erfolgt. Bei der Gegenüberstellung von Geymayer ist zu bedenken, daß die spezifischen Kriechmaße betrachtet wurden. Durch evtl. Festigkeitssteigerungen infolge der Temperatureinwirkungen oberhalb von  $70^\circ\text{C}$  könnte eine Verminderung des Kriechens eintreten, weil sich der Beanspruchungsgrad verringert.

Parrott untersuchte in mehreren Arbeiten /62, 63, 61, 65/ den Einfluß von Temperaturerhöhungen auf das Kriechen von Zementstein. In /62/ setzte er wassergelagerte Zementsteinproben im Alter von 28 d für die Dauer von 2 Tagen erhöhten Temperaturen von 75 °C bzw. 95 °C aus und untersuchte die Veränderungen des Kriechverhaltens bei anschließender Belastung. Die Proben wurden im Alter von rd. 50 d belastet, nachdem sie zuvor bei 20 °C und 85 % r.F. in ein hygrisches Gleichgewicht gebracht worden waren. Die Belastungsdauer betrug 56 d. Anschließend erfolgte unter Last eine Trocknung bei 55 % r. F. bis neues Gleichgewicht herrschte und eine weitere Kriechperiode von ca. 50 d Dauer. Wie aus Bild 12 ersichtlich ist, ermittelte Parrott eine deutliche Verminderung sowohl des Basis- als auch des Trocknungskriechens. Aus Messungen des Rückkriechens nach Entlastung /63/, das sich als weitgehend unabhängig von der Temperaturvorbehandlung erwies, leitete er ab, daß die Kriechbeeinflussung vorrangig im Fließanteil des Kriechens erfolgt. Außerdem stellte er eine Verminderung des Schwindens nach einer Temperaturvorbehandlung fest. Das Quellen nach einer Wiedersättigung erwies sich als wenig temperaturabhängig. Parrott stellte fest, daß der Anteil des chemisch gebundenen Wassers im Zementstein nur wenig von der Temperaturbehandlung abhing. Er schloß daraus, daß der Hydratationsgrad nach 28 d Wasserlagerung bereits so hoch war, daß die Temperierung keine weitere, beschleunigte Hydratation, verbunden mit wesentlichen Änderungen in der Struktur der Zementhydrate, bewirkte. Allerdings bemerkte er eine beschleunigte Trocknung des Zementsteins nach einer Temperierung, aufgrund derer er eine Veränderung der Kapillarporenverteilung zu größeren Poren hin vermutete. Die Druckfestigkeit des Zementsteins fiel durch die Temperierung nur geringfügig ab. Parrott stellte weiterhin fest, daß sich durch eine Temperaturerhöhung molekulare Bindungen zwischen Silikathydraten beschleunigt entwickeln, Silikat-Polymerisation genannt. Zwischen dieser Polymerisation und der Verminderung der Kriechverformungen nach einer Temperaturvorlagerung besteht nach Parrotts Auffassung eine enge Korrelation.

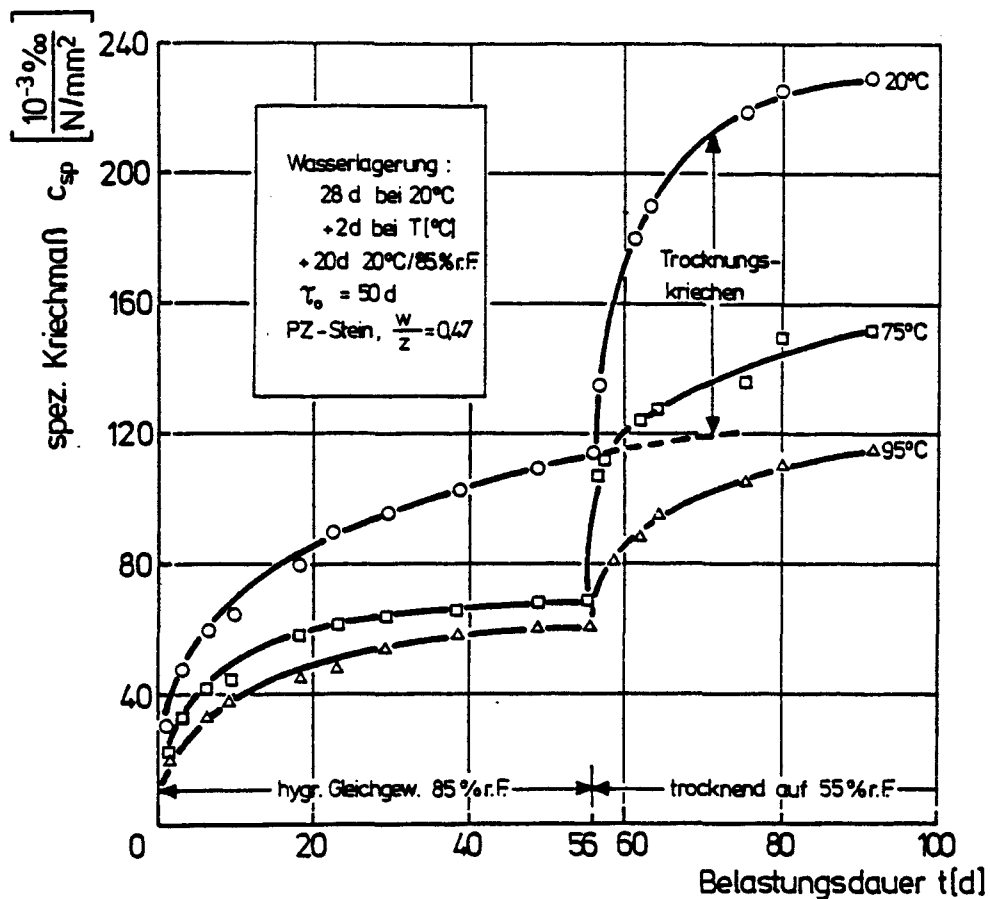


Bild 12 : Kriechen von Zementstein bei 20°C nach Vorlagerung bei erhöhter Temperatur; nach [62]

### 3.1.7 Bewertung und offene Fragen

Die Sichtung der Literatur zu den Einflüssen auf das Kriechen bei erhöhter Temperatur, die aus der Werkstoffkomposition und der Werkstoffbehandlung bis zur Belastung rühren, hat deren Bedeutung herausgestellt. Allerdings ist der Kenntnisstand besonders zu Einflüssen der Betonzusammensetzung gering. Üblicherweise werden diese Einflüsse gegenüber anderen als sekundär eingestuft. Außerdem zieht die Variation eines Parameters zwangsläufig Veränderungen anderer nach sich, so daß die Untersuchung von Einzeleinflüssen versuchstechnisch häufig nicht realisierbar ist.



Man kann davon ausgehen, daß die Zementart keine ausgeprägte Bedeutung für das Kriechen bei erhöhter Temperatur hat. Dies ist daraus zu schließen, daß sie schon bei Normaltemperatur nicht ausgeprägt kriechbeeinflussend wirkt und zudem im Bereich der hier angesprochenen Temperaturerhöhung von ihr keine wesentliche Änderung des Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhaltens ausgeht. Auch die Mahlfeinheit des Zements, die ja primär die Hydrationsgeschwindigkeit beeinflusst, tritt in ihrer Bedeutung bei erhöhter Temperatur und höherem Belastungsalter hinter andere Parameter zurück.

Für die Parameter Zementmenge und Zementleimmenge liegen Versuchsergebnisse für erhöhte Temperatur nicht vor. Sie sind von anderen, wohl wesentlicheren Parametern, besonders dem W/Z-Wert im Versuch nicht trennbar. Der W/Z-Wert, der ja für die offene Porosität des Zementsteins verantwortlich ist und großen Einfluß auf den Feuchtehaushalt ausübt, scheint für das Kriechen bei erhöhter Temperatur wichtig zu sein. Der Kenntnisstand ist aber gering.

Zum Einfluß der Zuschlagart wurden i.w. nur für Kalkstein und Quarzkies vergleichende Untersuchungen durchgeführt, die aber keine sichere Klärung erlauben. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich, besonders im Zusammenhang mit der Zugabe von Flugasche zu Kalksteinbeton. Das Kurzzeitfestigkeits- und Verformungsverhalten solchen Betons bei erhöhter Temperatur sowie das Kriechen bei Normaltemperatur weisen auf eine deutliche Beeinflussung des Temperaturkriechens hin.

Die Bedeutung des Belastungsalters tritt bei erhöhter Temperatur stark zurück. Bereits für Belastungsalter zwischen 28 und 90 d liegt kein deutlicher Einfluß mehr vor. Da Betonbauteile zum Zeitpunkt von Temperatur- und Lastbeanspruchungen üblicherweise älter als 90 d sind, sind hier keine weiteren Untersuchungen erforderlich.

Die Höhe und Dauer einer Temperatureinwirkung vor Belastung beeinflusst das spätere Kriechverhalten erheblich. Leider blieb der kriechmindernde Effekt von Temperaturvorbehandlungen in vielen Untersuchungen unberücksichtigt, indem weder die Zeit zwischen Aufheizung und Belastung kontrolliert noch in die Auswertung einbezogen wurde. Die Ursachen der Kriechminderung sind nicht endgültig geklärt.

### 3.2 Lasteinwirkung: Höhe und Dauer

#### 3.2.1 **Belastungsgrad**

Der Belastungsgrad  $\alpha$  ist als Verhältnis von aufgebrachter Druckspannung zur Druckfestigkeit bei Belastungsbeginn des Probekörpers definiert:

$$\alpha = \frac{\sigma_k}{\beta_D} \quad (6)$$

Bei Normaltemperatur wurde überwiegend Proportionalität zwischen den Kriechverformungen  $\epsilon_k$  und dem Belastungsgrad  $\alpha$  bis  $\alpha = 0,5$ , mitunter bis  $\alpha = 0,7$  festgestellt /56, 87/. Aufgrund dessen ist es möglich, Kriechversuche mittels des spezifischen Kriechmaßes  $c_{sp}$ , bzw. der Kriechzahl  $\varphi$  zu vergleichen, die ja unter dieser Voraussetzung unabhängig vom Belastungsgrad sind: ( $m = \text{Konstante}$ )

$$c_{sp} = \frac{\epsilon_k}{\sigma_k} = \frac{m \cdot \alpha}{\sigma_k} = \frac{m}{\beta_D} = \text{konst.} \quad (7)$$

bzw. unter der Voraussetzung von Proportionalität zwischen der kriecherzeugenden Spannung  $\sigma_k$  und der elastischen Dehnung  $\epsilon_{el}$ :

$$\varphi = \frac{\epsilon_k}{\epsilon_{el}} = \frac{\epsilon_k}{\sigma_k} \cdot E = \frac{m}{\beta_D} \cdot E = \text{konst.} \quad (8)$$

Die Druckfestigkeit  $\beta_D$  als Bezugswert für den Belastungsgrad wird im allgemeinen zu Beginn des Kriechversuches, im Belastungsalter  $\tau_0$  des Betons bestimmt. Die geschilderte Proportionalität zwischen  $\sigma_k$  und  $\alpha$  besteht trotz der Tatsache, daß die Druckfestigkeit während des Kriechvorgangs nicht konstant, sondern i.a. monoton ansteigend ist. Somit erfährt der effektive Belastungsgrad im Versuch eine Abminderung.

Erhöhte Temperatur während des Kriechvorganges kann sowohl eine Druckfestigkeitszunahme als auch -abnahme und damit eine Zu- oder Abnahme des effektiven Belastungsgrades zur Folge haben. Der Einfluß der Temperatur bis ca. 100 °C auf den Zusammenhang zwischen dem Kriechen und dem Belastungsgrad wurde in einigen Untersuchungen sowohl für versiegelten als auch trocknenden Beton erforscht /48, 40, 52, 49, 50/. Die Bezugsdruckfestigkeit wurde in /49, 50/ im Belastungsalter  $\tau_0$  des Betons und in /52, 48, 40/ im Belastungsalter  $\tau_e$  nach entsprechender Temperaturbeanspruchung wie die Kriechkörper bestimmt. Bild 13 zeigt die Kriechverformungen in Abhängigkeit des Belastungsgrades.

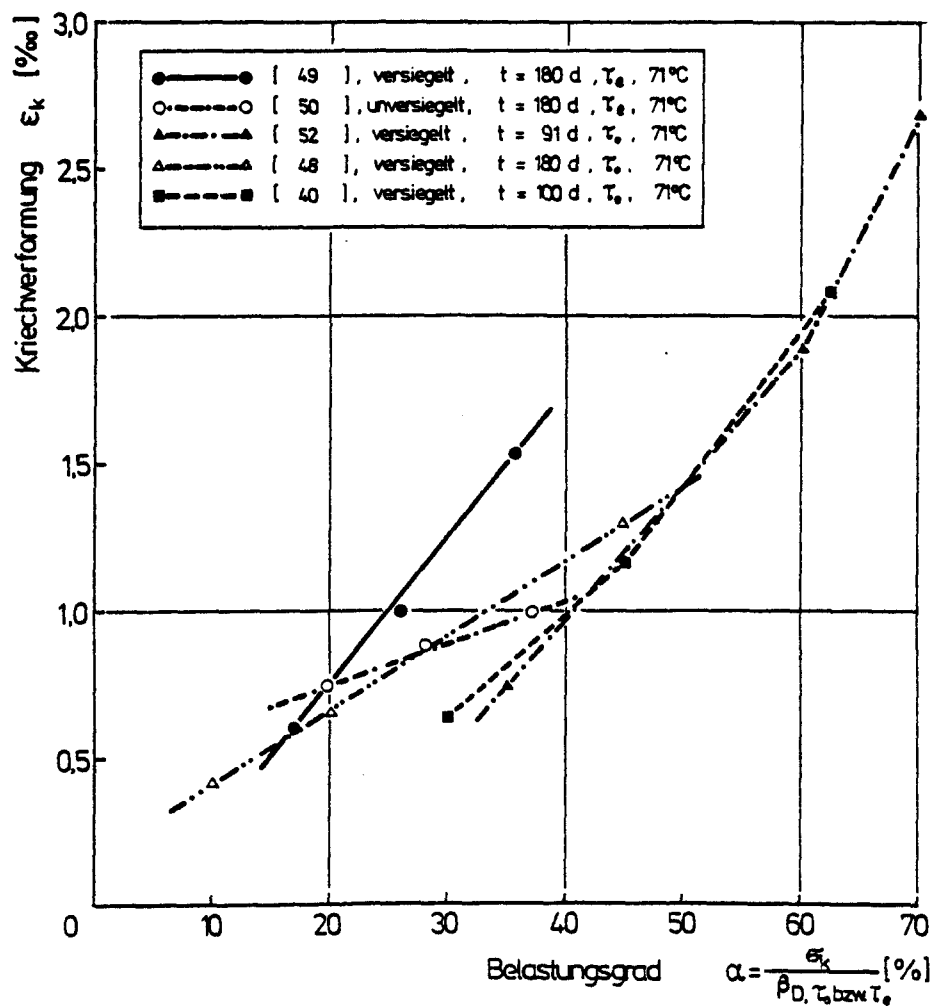


Bild 13 : Zusammenhänge zwischen den Kriechverformungen von Beton und dem Belastungsgrad  $\alpha$  bei erhöhten Temperaturen

Es ist erkennbar, daß im Bereich bis ca. 40 % Proportionalität überwiegt, bei höheren Belastungsgraden jedoch Abweichungen vom linearen Verlauf auftreten. Die Frage, ob auch bei höheren Belastungsgraden ein lineares Verhalten angenommen werden darf, wird auch für Normaltemperaturen noch kontrovers beurteilt. Deshalb wird durch eine erhöhte Temperatur keine neue Frage aufgeworfen, die an der Proportionalität im unteren Belastungsbereich zweifeln läßt.

### **3.2.2 Belastungsdauer**

Die Frage, ob das Kriechen von Beton einem Grenzwert zustrebt, ist bis heute nicht beantwortet. Auch an über 20 Jahre belasteten Kriechkörpern werden noch meßbare Kriechgeschwindigkeiten festgestellt /86, 68/.

Erhöhte Temperatur beschleunigt den Kriechvorgang insbesondere zu Beginn der Belastungsdauer, wie in einer Auswertung verschiedener Versuche festgestellt wurde /23/. Kriechversuche bei erhöhter Temperatur werden wegen ihres erhöhten Versuchsaufwandes i.a. für kürzere Belastungsdauern als bei Normaltemperatur durchgeführt. Die Versuchsdauer beträgt meistens ca. 100 bis 200 Tage, in wenigen Fällen bis 3 Jahre /28, '14/.

Es ist nicht klar, ob erhöhte Temperatur auch nach langer Belastungsdauer noch höhere Kriechgeschwindigkeit als bei Normaltemperatur bewirkt, oder ob zu irgendeinem Zeitpunkt aufgrund der früheren Kriechbeschleunigung ein möglicherweise begrenztes Kriechpotential erschöpft ist, woraus dann kleinere Kriechgeschwindigkeiten resultieren. Zu diesen Aspekten liegen unter-

schiedliche Beobachtungen vor Serafim /82/ stellte fest, daß im Belastungsalter  $\tau_0 = 3$  d belastete, versiegelte Betonkörper bei 45 °C ab ca. 7-tägiger Belastung langfristig die gleiche Kriechgeschwindigkeit aufweisen wie bei 20 °C kriechende Proben. Nach Browne und Blundell /14/ besteht bis 95 °C Proportionalität zwischen dem Logarithmus der Kriechverformung und dem der Belastungsdauer. Demzufolge bleibt eine erhöhte Kriechgeschwindigkeit für erhöhte Temperatur bestehen.

Das Problem des "Endkriechmaßes", das selbst bei Normaltemperatur noch ungelöst ist, soll auch hier nicht aufgegriffen werden. Auch wenn das Kriechen sich unendlich fortsetzen mag, wird nach langer Belastungszeit, hier mögen 10 - 20 Jahre genügen, die Kriechgeschwindigkeit so klein, daß sie für baupraktische Vorhersagemethoden unerheblich ist /11, 57/. Dies darf auch für den betrachteten Bereich erhöhter Temperaturen angenommen werden, da die Geschwindigkeitsdifferenzen für unterschiedliche Temperaturen ja bereits in beobachteten Versuchszeiträumen sehr gering werden, wie in Bild 14 ersichtlich ist.

In diesem Zusammenhang wichtig ist, festzustellen, welche Belastungsdauer bei Kriechversuchen bei erhöhter Temperatur nicht unterschritten werden sollte, um mit hinreichender Zuverlässigkeit auf die weitere Verformungsentwicklung schließen zu können. Bei Verwendung des Hyperbel-Ansatzes nach Ross /72/ zur Abschätzung einer Endkriechdehnung werden ca. 150 Tage angegeben /1, 89/. Zum Vergleich kriechbeeinflussender Werkstoffparameter und thermisch-hygrischer Umgebungsparameter sind Belastungsdauern unterhalb von 100 Tagen üblich.

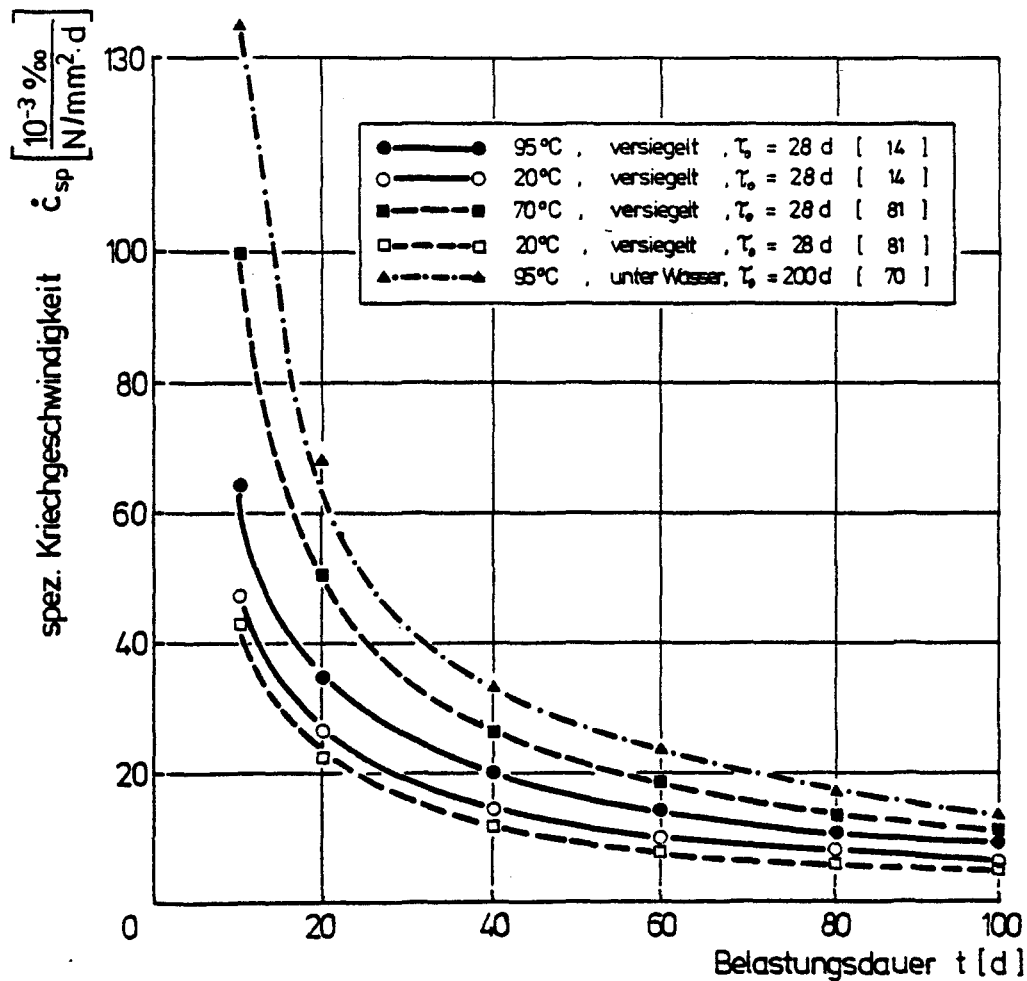


Bild 14 : Einfluß der Belastungsdauer auf die spezifische Kriechgeschwindigkeit von Beton bei erhöhten Temperaturen

### 3.2.3 Rückverformung nach Entlastung

Nach Entlastung eines Kriechkörpers nimmt die aufgebaute Kriechverformung zeitabhängig teilweise wieder ab. Der rückgewonnene Verformungsanteil wird als verzögert-elastische Dehnung  $\epsilon_v$  bezeichnet. Die verzögert-elastische Dehnung muß zwangsläufig bereits unter Belastung aufgebaut worden sein. Daraus ergibt sich die äußerst wichtige Erkenntnis, daß Kriechen gleich der Summe verzögert-elastischer Dehnung und einer irreversiblen Dehnung, des Fließens, ist:

$$\epsilon_k = \epsilon_v + \epsilon_f \quad (9)$$

Wird die verzögert-elastische Dehnung nach Entlastung im Anschluß an einen Kriechversuch bei erhöhter Temperatur unter weiterhin einwirkender, erhöhter Temperatur beobachtet, können daraus Erkenntnisse gewonnen werden, welchem Kriechanteil die kriechsteigernde Wirkung erhöhter Temperatur vorwiegend zuzuordnen ist.

In einem Teil der Kriechversuche bei erhöhter Temperatur wurde während unterschiedlicher Beobachtungszeiträume nach der Entlastung die verzögert-elastische Rückverformung gemessen. Leider berichten die meisten Forscher nur qualitativ über ihre Erkenntnisse. So stellten Arthanari und Yu /4/, Nasser und Neville /52, 56/, Nasser und Lohtia /49/, Hannant /27/ und McDonald /46/ fest, daß die verzögert-elastische Rückverformung temperaturunabhängig ist. Im Gegensatz dazu geben Illston und Sanders in /39/ auf Basis von Versuchen von Sanders /75/ folgende Abhängigkeit des Grenzwertes der spezifischen, verzögert-elastischen Dehnung  $c_{sp,v\infty}$  in  $[10^{-3}\text{‰}/\text{N}/\text{mm}^2]$  von der Temperatur  $T$  in  $[^{\circ}\text{C}]$  an:

$$c_{sp,v\infty} = 6,9 + 0,44 \cdot T \quad (10)$$

Ergebnisse von Glucklich und Ishai /26/ deuten ebenfalls darauf hin, daß die verzögert-elastische Dehnung mit der Temperatur ansteigt.

Für Normaltemperatur wird in der Literatur als gesichert angenommen, daß die verzögerte Elastizität von der Probenfeuchtigkeit, der Probenform und der Betonzusammensetzung unbeeinflusst bleibt /1/. Außerdem wird in /1/ der zeitliche Verlauf der verzögerten Elastizität für Normaltemperatur als weitgehend unabhängig vom Betonalter und der Belastungsdauer bezeichnet. An gleicher Stelle wird darauf hingewiesen, daß zur Frage, ob ein Grenzwert der verzögerten Elastizität besteht /1, 37/ oder nicht /8/, bzw. ob dieser ggf. vom Betonalter abhängig ist /10/ oder nicht /73/, noch Uneinigkeit herrscht.

Einem umfangreichen Kenntnisstand über Höhe und zeitlichen Verlauf der verzögert-elastischen Dehnung bei Normaltemperatur steht nur sehr wenig Wissen für erhöhte Temperatur gegenüber. Illston und Sanders /39/ beurteilen die Höhe der verzögerten Elastizität bei erhöhter Temperatur als unabhängig vom Betonalter, die zeitliche Entwicklung hingegen als altersabhängig.

Die zeitliche Entwicklung der verzögerten Elastizität bei unterschiedlicher Betonfeuchtigkeit und Temperatur wurde von Seki und Kawasumi /81/ beobachtet. Ihre Ergebnisse sind in Bild 15 dargestellt. Demnach zeigen sich bei 40 °C leicht höhere und bei 70 °C leicht geringere Werte für die verzögert-elastische Rückverformung als bei 20 °C. Unversiegelte Proben weisen bei 20 °C etwas höhere verzögerte Elastizität auf als versiegelte, bei 40 und 70 °C ist das Gegenteil der Fall. Im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit ist jedoch keine signifikante Abhängigkeit von der Feuchtigkeit oder Temperatur interpretierbar.

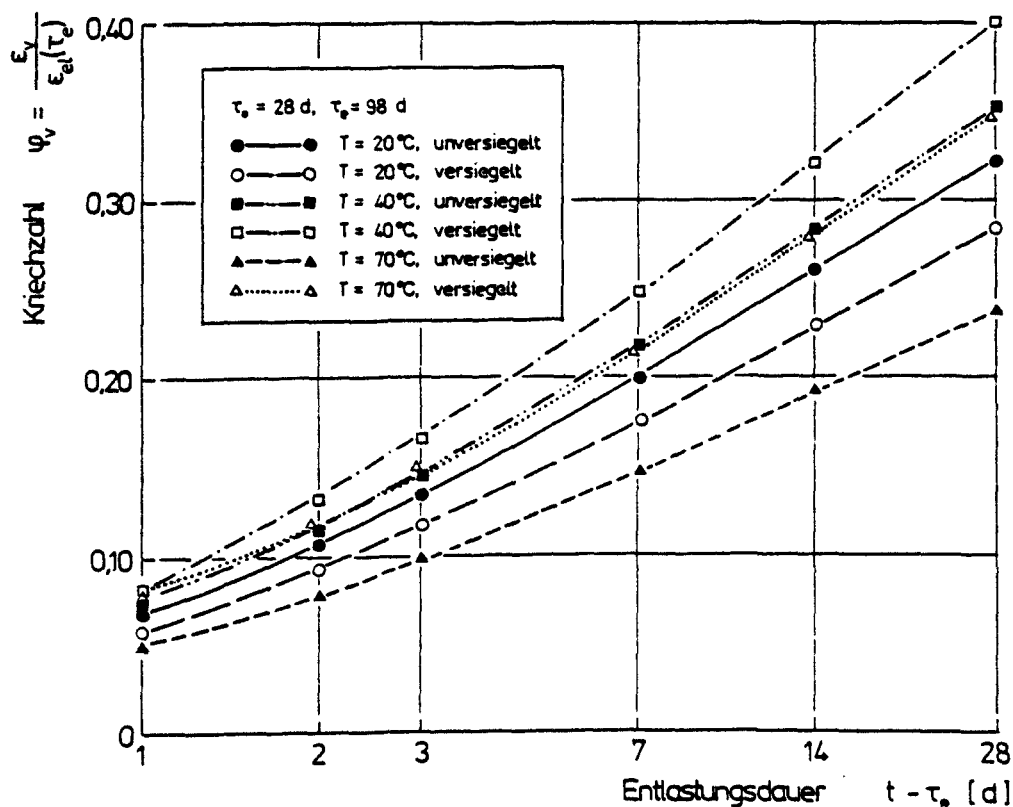


Bild 15 : Zeitliche Entwicklung der verzögerten Elastizität bei unterschiedlicher Feuchte und Temperatur, nach, [ 81 ]



Kommandant et al kommen in [40] ebenfalls zu dem Schluß, daß die verzögert-elastische Rückverformung temperaturunabhängig ist. Sie untersuchten höheres Belastungsalter (90 d) und längere Belastungsdauer (ca. 400 d) als Seki und Kawasumi. Ihre Ergebnisse sind in Bild 16 ausgewertet.

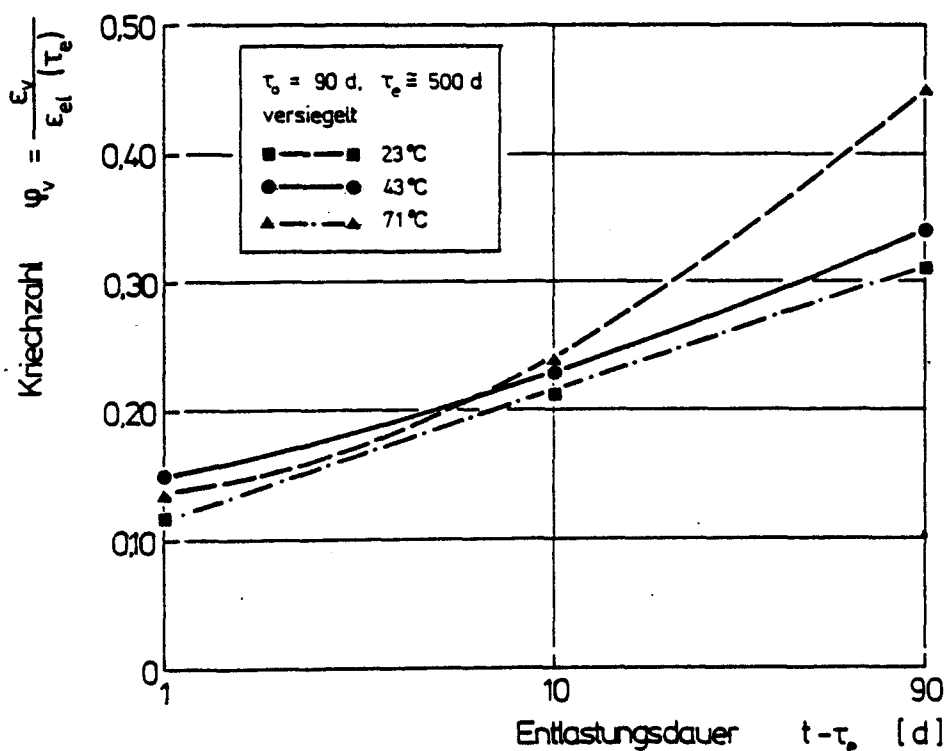


Bild 16 : Zeitliche Entwicklung der verzögerten Elastizität für unterschiedliche Temperatur, nach [ 40 ]

### 3.2.4 Bewertung und offene Fragen

In den meisten Untersuchungen bei Normaltemperatur wird bis zu einem Belastungsgrad von  $\alpha = 0,50$  Proportionalität zwischen der Kriechverformung und dem Belastungsgrad festgestellt. Erhöhte Temperatur während des Kriechens kann Festigkeitsänderungen verursachen. Demzufolge ändert sich während der Versuche der effek-

tive Belastungsgrad gegenüber dem Belastungsgrad, dem die Festigkeit bei Belastung zugrunde liegt, möglicherweise deutlich. Dessen ungeachtet stellte man im hier betrachteten Temperaturbereich Proportionalität bis etwa  $\alpha = 0,40$  fest, wobei der Belastungsgrad entweder im Belastungsalter  $\tau_0$  oder im Entlastungsalter  $\tau_e$  ermittelt wurde. Es ist daher unnötig, den Einfluß des Belastungsgrades bei mäßig erhöhter Temperatur weiter experimentell zu untersuchen.

Hinsichtlich des Einflusses der Belastungsdauer auf das Kriechen stellen sich Fragen zum einen nach der Existenz eines Grenzwertes und zum anderen nach dem Zeitraum, in dem eine erhöhte Temperatur kriechbeschleunigend gegenüber Normaltemperatur wirkt. Das Problem des "Endkriechmaßes" ist auch bei Normaltemperatur noch ungelöst. Zum Aspekt der zeitlichen Entwicklung des Kriechens bei erhöhter Temperatur gegenüber der bei Normaltemperatur, liegen sowohl Beobachtungen vor, die auf eine fortgesetzte erhöhte Kriechgeschwindigkeit hinweisen, als auch solche, die von einem Abklingen auf die Kriechgeschwindigkeit bei Normaltemperatur sprechen. Allerdings wird die Differenz der Kriechgeschwindigkeiten für unterschiedliche Temperaturen nach einer Belastungsdauer von über 100 d so klein, daß die Auswirkungen auf die Kriechverformungen nach 10- bis 20-jähriger Belastungsdauer möglicherweise unerheblich werden. Zwar besteht im Hinblick auf die zuverlässige Prognose langzeitiger Kriechverformungen bei erhöhter Temperatur wichtiges Interesse an einer Beantwortung der Frage, sie ist jedoch mit vertretbarem Versuchsaufwand nicht beantwortbar.

Die Beobachtung der verzögert-elastischen Rückverformung nach Entlastung im Anschluß an einen Kriechversuch bei erhöhter Temperatur ermöglicht Rückschlüsse darauf, mit welchen Vorgängen im Werkstoff die kriecherhöhende Wirkung erhöhter Temperatur zusammenhängt. Es liegen derzeit sowohl Versuchsergebnisse vor, die besagen, daß die verzögerte Elastizität temperaturunabhängig ist,

als auch solche, die eine Temperaturabhängigkeit belegen. Auch die Kenntnis der verzögerten Elastizität in Abhängigkeit von weiteren Versuchsparametern wie Betonalter, Betonzusammensetzung, Feuchtezustand usw. ist von Wichtigkeit für die Ermittlung zutreffender Prognoseverfahren. Einem umfangreichen Wissensstand hierzu für Normaltemperatur steht vergleichsweise bescheidenes Wissen für erhöhte Temperatur gegenüber. Daher muß die verzögert-elastische Dehnung bei jedem Kriechversuch gemessen werden.

### 3.3 Thermisch-hygrische Umgebungsbedingungen

#### 3.3.1 Erhöhte Temperatur im stationären Zustand

Über den Einfluß erhöhter Temperatur auf das Betonkriechen, den hier betrachteten Bereich von 20 bis ca. 100 °C eingeschlossen, erschienen in den vergangenen 20 Jahren zahlreiche Veröffentlichungen. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß die Kriechverformungen mit steigender Temperatur zunehmen. Über das Ausmaß der Kriecherhöhung und zum Problem, ob bis 100 °C eine Temperatur mit einem Kriechmaximum existiert und bei welcher Temperatur es ggf. auftritt, werden sehr unterschiedliche Ansichten geäußert. Bild 17 zeigt einen Überblick über Kriechverformungen von versiegeltem Beton bei erhöhten Temperaturen. Bei 80 °C ist demnach mit 2- bis 3-fachen, teilweise bis 4,5-fachen Kriechverformungen gegenüber 20 °C zu rechnen.

In einem Literaturvergleich unterscheidet Schneider /76/ nach zwei deutlich unterschiedlichen Ergebnisgruppen. Während eine Gruppe bei 60 bis 80 °C etwa 4- bis 5-fache Kriechverformungen gegenüber 20 °C zeigt, herrschen in der anderen Gruppe bei dieser Temperatur nur etwa 2-fache Erhöhungen vor. Schneider vermutet, daß für diese großen Unterschiede unterschiedliche Feuchtegehalte der Proben verantwortlich sind. Außerdem bezweifelt er die Zuverlässigkeit der dampfdichten Versiegelungen in manchen Versuchen bei erhöhter Temperatur und weist auf unbemerkte Fehlerquellen hin. In anderen Literaturauswertungen werden bei 80 °C etwa 2,5-fache Kriechverformungen /5/ bzw. 4- bis 5-fache Kriechverformungen /23, 16/ gegenüber 20 °C ermittelt.

Die oben erläuterte Aufspaltung in zwei Ergebnisgruppen an versiegeltem Beton wurde in anderen Vergleichsuntersuchungen nicht festgestellt (vgl. auch Bild 17). Neuere Untersuchungen /70, 91/ an dauernd wassergelagerten bzw. zuerst wassergelagerten und anschließend versiegelten Probekörpern weisen ebenfalls auf etwa 4- bis 5-fache Kriechverformungen hin, wohingegen an direkt nach der

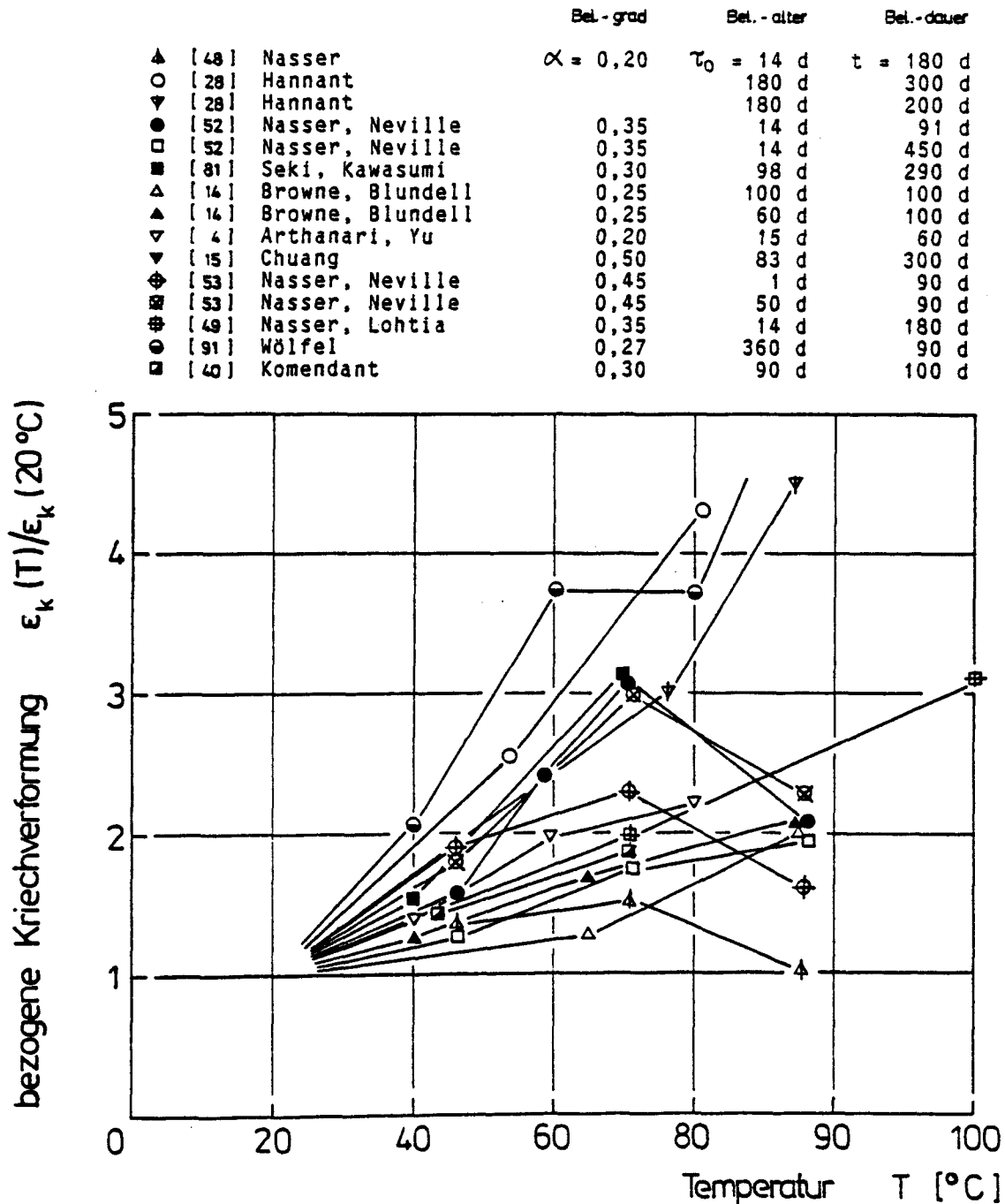


Bild 17 : Bezogene Kriechverformungen von versiegeltem Beton bei erhöhten Temperaturen

Herstellung ( $W/Z = 0,39$ ) mit einem verlöteten Kupfermantel versiegelten Betonproben bei  $120^{\circ}\text{C}$  nur ca. 2- bis 2,5-fache Kriechverformungen gemessen wurden /40, 24/. Ebenfalls 2,5- bis 3-fache Kriechverformungen bei  $80^{\circ}\text{C}$  wurden in /7/ an eigenfeucht versiegelten Betonzylindern ( $W/Z = 0,52$ ) festgestellt. Das Belastungsalter betrug jeweils mindestens 90 Tage, und die Verhältnismerte wurden nach ca. 100 Tagen Belastungsdauer ermittelt.

Bezüglich der Existenz eines Kriechmaximums herrschen unterschiedliche Auffassungen. England und Ross /18/ stellten ein Kriechmaximum nach ca. 80-tägiger Belastung bei etwa  $100^{\circ}\text{C}$  sowohl für versiegelten als auch für trocknenden Beton fest. Nasser und Neville hingegen beobachteten eine maximale Verformung nach 21- bis 90-tägiger Belastungsdauer bei etwa  $71^{\circ}\text{C}$  für versiegelten und wassergelagerten Beton /52/. Nach über 90-tägiger Belastung konnte dann aber kein Kriechmaximum mehr festgestellt werden. In einer späteren Untersuchung an ähnlich zusammengesetztem und vorbehandeltem Beton, der unversiegelt blieb /50/, ermittelten sie ebenfalls ein Kriechmaximum bei  $71^{\circ}\text{C}$ . Marechal stellte an unversiegeltem Beton ein Maximum bei  $50^{\circ}\text{C}$  fest.

Einen etwa linearen Zusammenhang zwischen den Kriechverformungen und der Temperatur bis  $95^{\circ}\text{C}$  ergaben die Versuche von Hannant /28/ an 5 Monate wassergelagertem und anschließend versiegeltem Kalksteinbeton. Hickey /34/ konnte an unversiegeltem Beton bis  $100^{\circ}\text{C}$  ebenfalls kein Maximum feststellen. Dies gilt auch für die Ergebnisse von Arthanari und Yu /4/ an versiegeltem und trocknendem Beton bis  $80^{\circ}\text{C}$ , sowie für die Messungen von Seki und Kawasumi /81/ an versiegeltem und trocknendem Beton für Belastungsalter bis 98 Tage und Belastungsdauern bis 300 Tage. Auch Komendant /40/ beobachtete für Belastungsalter bis 270 Tage und Belastungsdauern bis 300 Tage an versiegeltem Beton einen kontinuierlichen Anstieg der Kriechverformungen bis  $71^{\circ}\text{C}$ .

Bei der Betrachtung der genannten Ergebnisse ist zu beachten, daß nach Geymayers Erkenntnissen /23/ innerhalb bestimmter Belastungszeitintervalle, z.B. zwischen 1 und 107 Tagen, durchaus Maxima der Kriechgeschwindigkeit für bestimmte Temperaturen existieren können, ohne daß sich am Ende dieses Intervalls auch ein Maximum der Kriechverformungen einstellt. Er schließt daraus, daß sich ein großer Teil der Kriechverformungen vor Beginn des betrachteten Zeitintervalls, also z.B. innerhalb des 1. Belastungstages entwickelt. Geymayer ermittelte auch für jene Versuche aus der Literatur, die kein Kriechmaximum aufwiesen, die mittlere Verformungsgeschwindigkeit innerhalb des Zeitintervalls zwischen  $t_0 = 1 \text{ d}$  und  $t_1 < 107 \text{ d}$  Belastung als Funktion der Temperatur. Dazu griff er aus halb-logarithmisch dargestellten Kurven für die spezifische Kriechverformung die mittlere Steigung zu

$$m_{01} = \frac{c_{sp,1} - c_{sp,0}}{\log t_1 - \log t_0} \quad (11)$$

heraus. So dargestellt wiesen einige der Versuche, u.a. die meisten mit unversiegelten Proben, gleichfalls Maxima der Kriechgeschwindigkeit zwischen 50 und 100 °C auf /34, 18, 4/, andere wiederum nicht /81, 53, 45/.

Zur Erklärung der Temperaturabhängigkeit des Kriechens wurden verschiedene Ansätze gemacht. Maréchal /45/ stellte an eigenen Versuchsergebnissen und denen von Hannant /28/ fest, daß die Kriecherhöhung bei erhöhter Temperatur mit der abnehmenden Viskosität des Wassers in Verbindung gebracht werden kann. Bei wassergesättigtem, versiegeltem Beton steigt die Kriechgeschwindigkeit linear mit der abnehmenden Viskosität des Wassers bei Temperaturerhöhungen an (s. Bild 18). Danach ist das Betonkriechen also idealisiert als das Fließen einer Newton'schen Flüssigkeit darstellbar. Temperatur und Viskosität des Wassers sind dabei in folgender Weise miteinander verknüpft:

$$\ln \eta_w \sim \frac{1}{T} \quad (12)$$

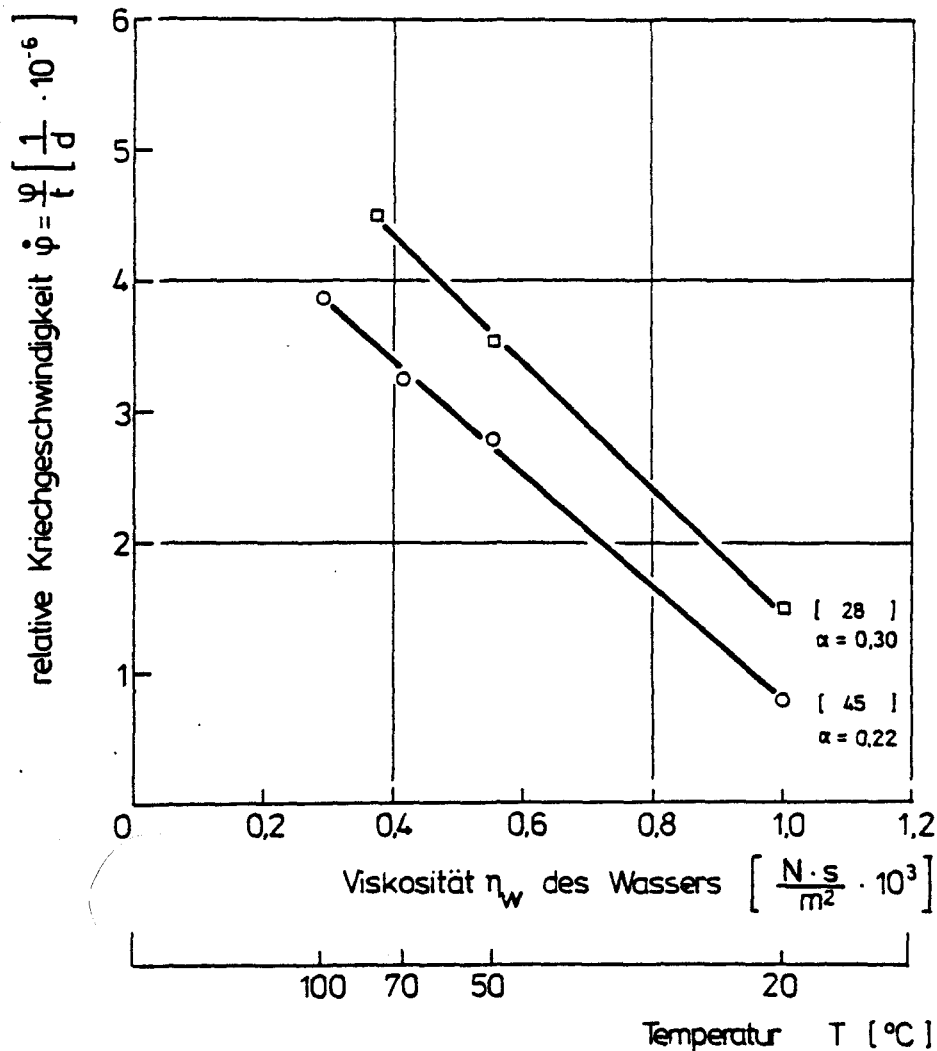


Bild 18: Relative Kriechgeschwindigkeit von Beton in Funktion der Wasserviskosität bei erhöhter Temperatur, nach [ 45 ]

Der Zusammenhang zwischen Betonkriechen und  $\eta_w$  ist selbstverständlich nur bis zu einer Temperatur denkbar, bis zu der keine Phasenänderung des kriechbeeinflussenden Gelwassers stattfindet /30/. Nasser und Neville /52/ vermuten die Phasenänderung bei etwa 70 bis 80 °C, die dann mit einer entscheidenden Verringerung der Kriechgeschwindigkeit verbunden sein soll. Zudem steigt mit einer Temperaturzunahme auch die Verformbarkeit der festen Gelbestandteile /52/ bis evtl. Gefügeänderungen auftreten, die zur



Verringerung der Kriechgeschwindigkeit führen können. Helmuth /33/ vermutet, daß sich durch jede Aufheizung bereits irreversible Strukturänderungen im Zementgel einstellen, die für die Kriechzunahme verantwortlich sind.

Peschel /66/ maß die Viskosität sehr dünner Wasserfilme ( $80 \text{ \AA}$ ) zwischen zwei Glasplatten und stellte einige Maxima fest, u.a. eines bei  $62,5^\circ\text{C}$ . Möglicherweise lassen sich dadurch in Versuchen festgestellte Kriechmaxima zwischen  $50$  und  $70^\circ\text{C}$  erklären.

An dieser Stelle sei nochmals auf Geymayers /23/ Beobachtungen hingewiesen: Sowohl an versiegeltem als auch an trocknendem Beton konnte eine Temperatur mit einem Maximum der Kriechgeschwindigkeit festgestellt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Proben frühzeitig, d.h. ca. 2 Wochen vor der Belastung auf die Versuchstemperatur aufgeheizt wurden. Hingegen wurde bei den Serien, die innerhalb von 24 Stunden nach der Aufheizung belastet wurden kein Maximum beobachtet. Eine Erklärung für diese Beobachtung liegt nicht vor.

### 3.3.2 Einfluß der Feuchte

In Abschnitt 3.3.1 wurde gezeigt, daß bis  $100^\circ\text{C}$  das verdampfbare Wasser eine bedeutende Rolle im Kriechmechanismus spielt. Schneider /78/ vermutet, daß in diesem Temperaturbereich der Einfluß der Feuchte bzw. der Feuchtwanderung den der Temperatur überwiegt.

Die Feuchtebedingungen werden im Versuch üblicherweise berücksichtigt, indem Probekörper entweder möglichst vollständig gegen Feuchteverlust geschützt, also versiegelt werden, oder aber frei austrocknen können.

An versiegelten Probekörpern wird das sog. "Grundkriechen" untersucht, das i.w. ohne Masseänderung stattfindet und neben Werkstoff- und anderen Versuchsparametern vom Gehalt an verdampfbarem Wasser und der Temperaturhöhe abhängt. Wird Beton direkt nach der

Herstellung versiegelt, so ist die verdampfbare Wassermenge durch den Gehalt an Anmachwasser bzw. den W/Z-Wert vorgegeben und zu beliebigen Zeitpunkten mit Hilfe des Hydratationsgrades bestimmbar. Erfolgt die Versiegelung erst zu einem späteren Zeitpunkt, wird die verdampfbare Wassermenge darüber hinaus durch die Lagerungsbedingungen beeinflusst.

Das Problem der Vergleichbarkeit "versiegelter" Kriechversuche rührt in einem wesentlichen Anteil aus der Unkenntnis des tatsächlichen Feuchtegehaltes während des Versuchs. Systematische Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Feuchtegehalte auf das Kriechen von versiegeltem Beton wurden nur in geringer Anzahl durchgeführt. Hansen /30/ und Wittmann /90/ untersuchten das Grundkriechen für verschiedene Feuchten bei 20 °C. Wittmann trocknete Zementsteinproben bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz. Dann lagerte er sie bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten bis zur Ausgleichsfeuchte. Bild 19 zeigt die Kriechverformungen als Funktion der Belastungsdauer; in Bild 20 ist die Kriechgeschwindigkeit nach verschiedenen Belastungsdauern in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt.

Man erkennt, daß die Kriechgeschwindigkeit mit zunehmender Feuchtigkeit deutlich ansteigt und die Kriechverformungen im Beobachtungszeitraum wesentlich höher sind. So ist die Kriechverformung bei 90 % r.F. ungefähr doppelt so groß wie bei 40 bis 70 % r.F., dem üblichen Feuchtebereich für Innenbauteile. Ferner beobachtete Wittmann, daß auch völlig trockener Zementstein kriecht und ein deutlicher Anstieg der Kriechgeschwindigkeit erst oberhalb von 40 % r.F. eintritt. Er schließt daraus, daß Powers' Theorie des "load-bearing-water" /69/, die die Kriechursachen ausschließlich im adsorbierten Wasser sieht, nicht zutreffen kann. Bei 0 % r.F. dürfte hiernach kein Kriechen auftreten. Außerdem müßte bei 40 % r.F. bereits nahezu die Kriechgeschwindigkeit einer feuchten Probe vorliegen, weil bei dieser Feuchte die ggf. lasttragenden, adsorbierten Wasserfilme bereits weitgehend ausgebildet sind.

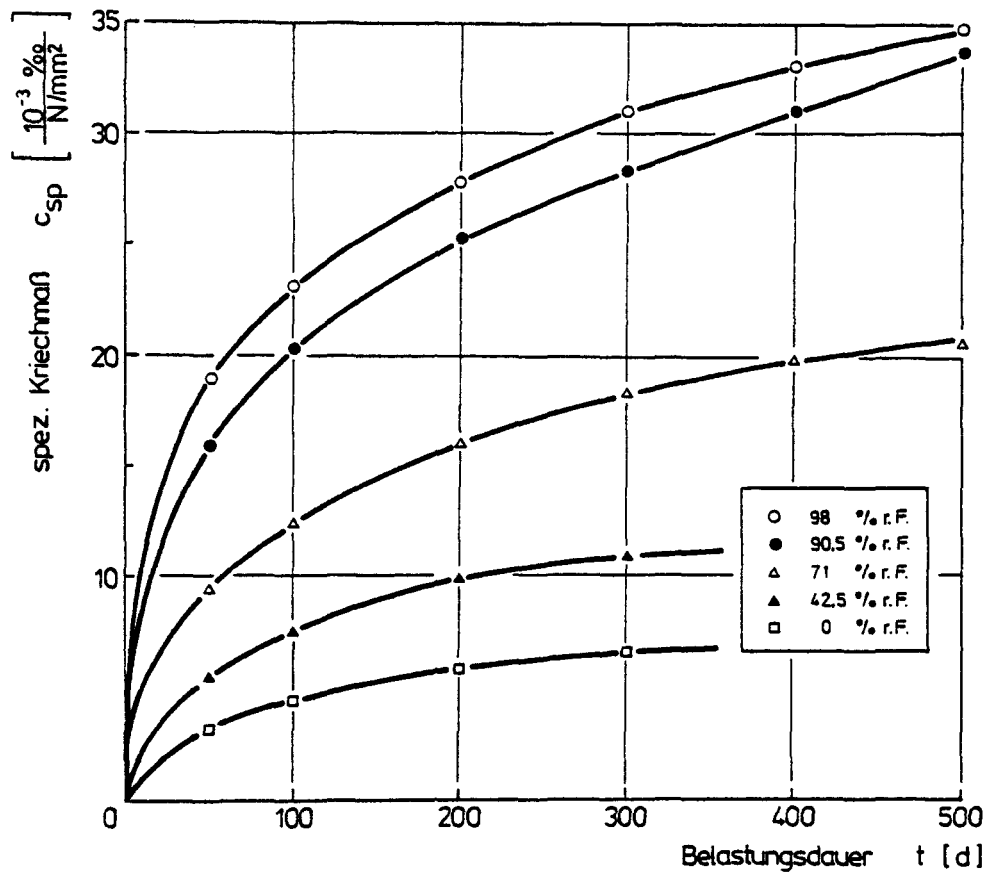


Bild 19 : Spez. Kriechmaß von Zementstein ( $w/z = 0,40$ ) bei  $20^\circ\text{C}$  in Funktion der Belastungsdauer, nach [ 90 ]

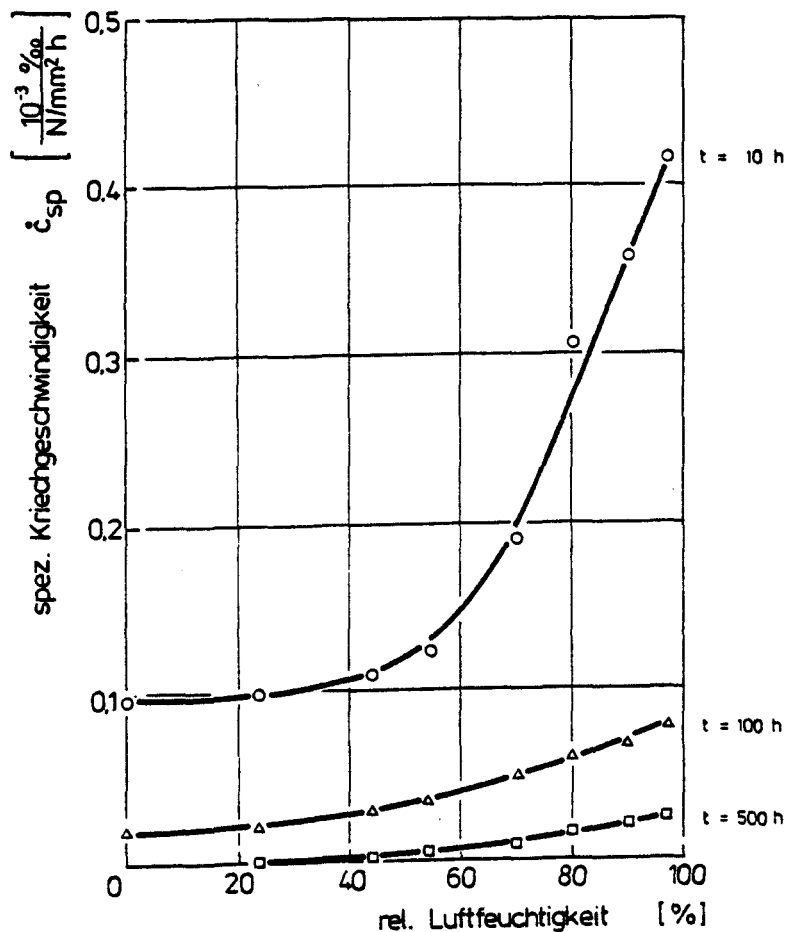


Bild 20 : spez. Kriechgeschwindigkeit von Zementstein in Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit nach unterschiedlichen Belastungsdauern bei  $20^\circ\text{C}$ , nach [ 90 ]

Hannant /28/ verglich das Kriechverhalten von teilweise vorge-trockneten und dann versiegelten Proben mit dem von wassersatt versiegelten bei 20 °C und 70 °C. Beide Serien wurden 180 d unter Wasser vorgelagert. Die Vortrocknung erfolgte bei 75 °C; 80 % des Anmachwassers wurden ausgetrieben. Bild 21 zeigt Hannants Ergebnisse, sie verdeutlichen den großen Einfluß der Ausgangsfeuchte. Nach einer Belastungsdauer von 200 d und bei 70 °C weisen die wassersatten Proben etwa die zehnfachen Kriechverformungen gegenüber den vorgetrockneten auf. Für die Temperatur von 27 °C beträgt der entsprechende Verhältniswert 7. Das Kriechen vorge-trockneter Proben ist in Hannants Versuchen bereits nach ca. 20-tägiger Belastung abgeschlossen. Die wassersatten Proben lassen auch nach 200 Tagen noch deutliche Kriechgeschwindigkeiten erkennen.

Wölfel /91/ variierte den Feuchtegehalt von Betonproben folgendermaßen: Eine Serie von Probekörpern wurde nach zunächst 7-tägiger Wasserlagerung versiegelt. Die andere wurde bis zum Belastungsalter  $\tau_0 = 90$  d bei 20/65 gelagert und erst dann versiegelt. In Bild 22 ist die Kriechzahl  $\varphi$  aus Wölfels Versuchen für die Prüftemperaturen 80 °C und 20 °C als Funktion der Belastungszeit dargestellt. Der Belastungsgrad betrug 27 %. Bei 20 °C ist signifikanter Einfluß der Feuchte nicht ersichtlich; bei 80 °C zeigt Beton mit einer höheren Feuchte größere Kriechverformungen. Bei der Wertung von Wölfels Versuchen ist zu bedenken, daß sich aufgrund der unterschiedlichen Vorlagerungen die Reifegrade bei Belastungsbeginn unterscheiden können.

Wird Beton nur teilweise oder gar nicht vor Trocknung geschützt, treten zusätzliche Probleme auf. Die bisherigen Versuche wurden in der Regel folgenderweise durchgeführt: Aufheizung auf Prüftemperatur, Zeitraum für Temperatúrausgleich und -stabilisierung, Belastung. Parallel dazu erfolgten Verformungsmessungen an unbelasteten Proben. Aus der Differenz der Messungen ergaben sich die Kriechverformungen.

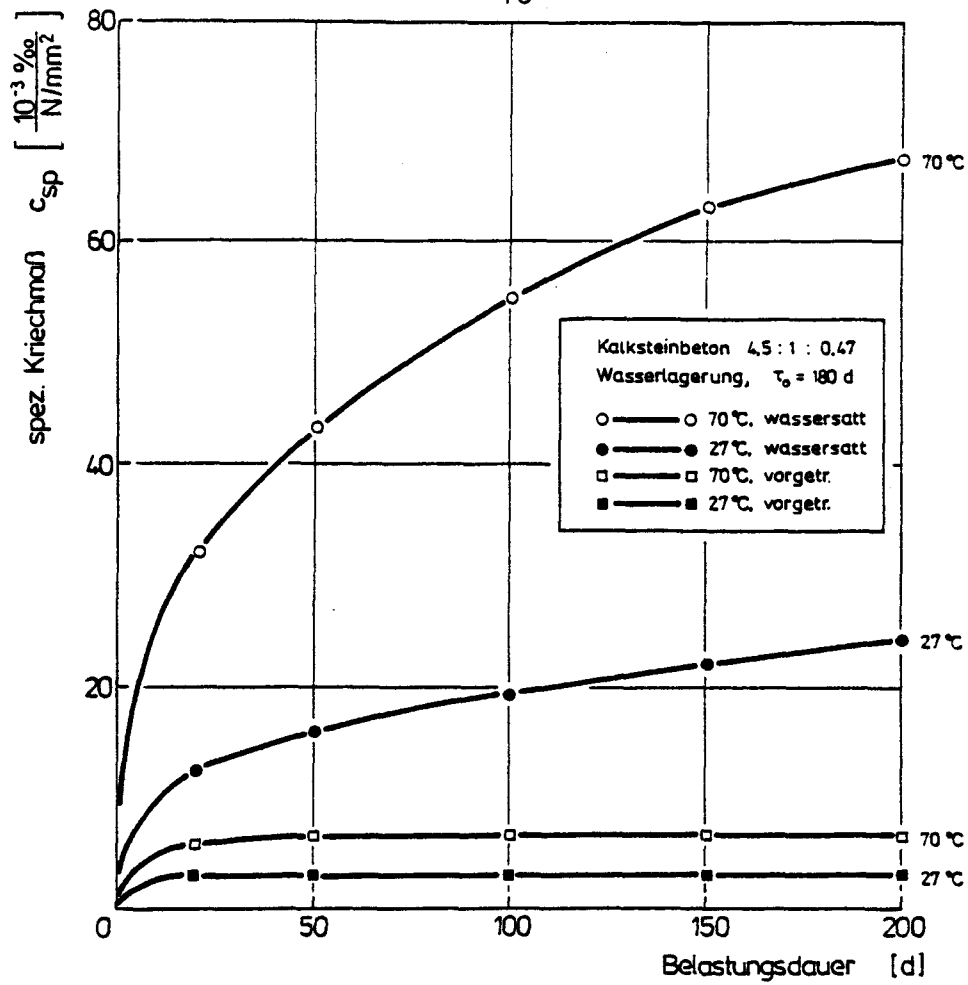


Bild 21 : Spez. Kriechmaß wassersätt versiegelten, bzw. vorgetrocknet und versiegelten Betons bei erhöhter Temperatur, nach [ 28 ]

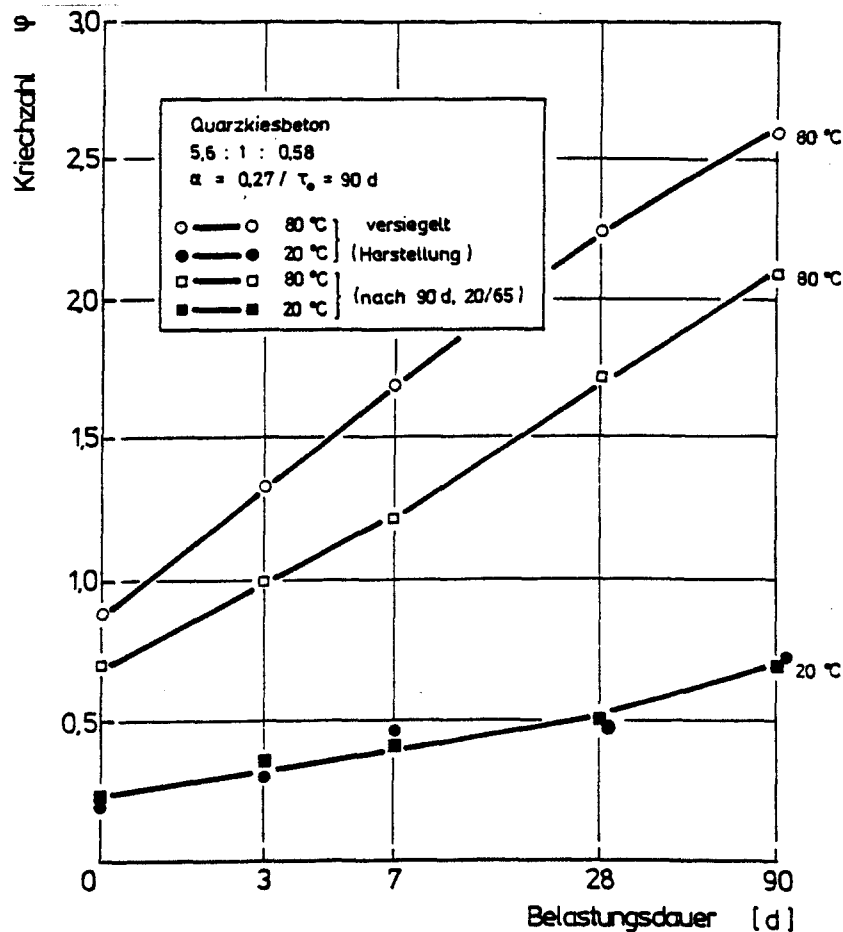


Bild 22 : Einfluß der Betonfeuchte auf die Kriechzahl bei erhöhter Temperatur,

Diese Vorgehensweise verursacht jedoch Unsicherheiten, weil Menge und Verteilung der Feuchte unbekannt sind. Die Kriechgeschwindigkeit hängt nämlich nicht nur von der Temperaturhöhe und der aus Herstellung und Lagerung resultierenden Ausgangsfeuchte ab. Sie wird zusätzlich durch die Entfeuchtung geprägt, die bereits vor der Belastung in der Aufheiz- und Temperaturstabilisierungsphase abläuft und die die Trocknungsgeschwindigkeiten während der Belastung reduziert. Außerdem ist die Austrocknung vor Belastung auch von der Temperaturhöhe abhängig.

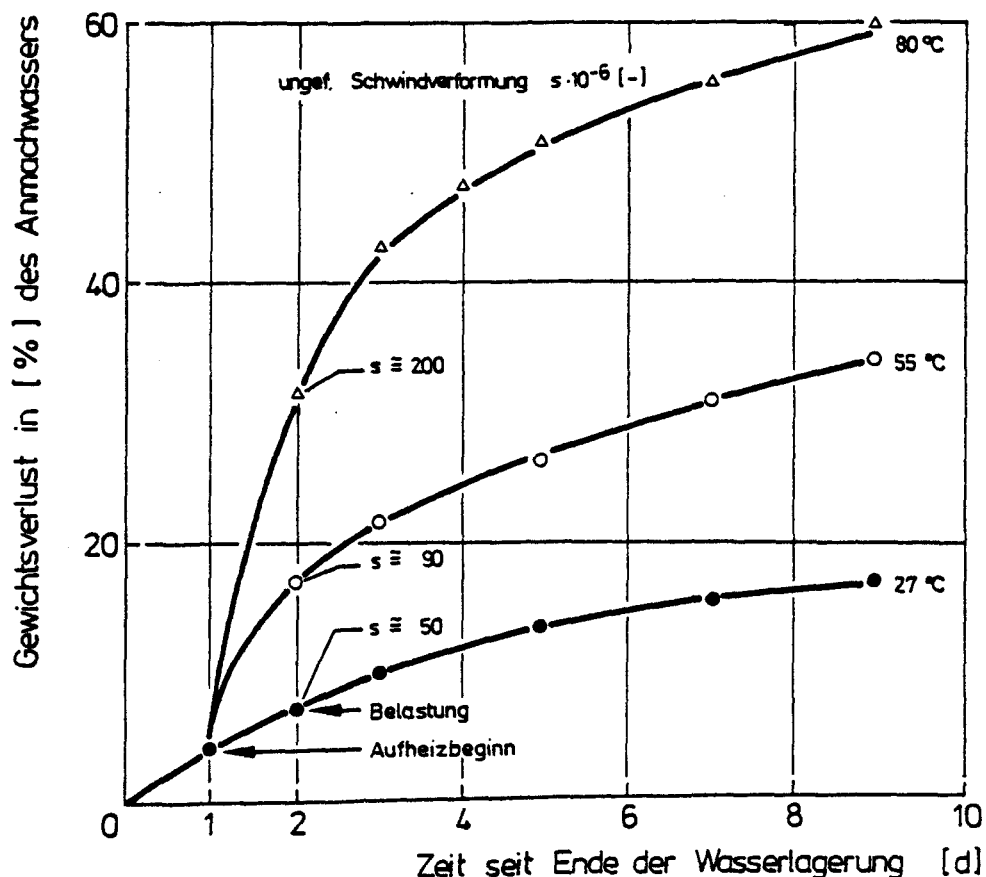


Bild 23 : Gewichtsverlust von Betonzylindern (  $d = 10$  cm,  $h = 30$  ) nach Entnahme aus Wasserlagerung, nach, [ 28 ]

Hannant /28/ machte auf diese Problematik aufmerksam (Bild 23). Er heizte Betonzyylinder ( $d = 10 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ) nach 6-monatiger Wasserlagerung mit  $10 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$  auf unterschiedliche Temperaturen auf. Die Aufheizung begann 24 h nach Wasserlagerung. Weitere 24 h später erfolgte die Belastung. Zu diesem Zeitpunkt liegen bereits in solchem Maße unterschiedliche Gewichtsverluste vor, daß ein Vergleich des temperaturabhängigen Kriechens aussichtslos ist. Dieses Problem ist für die geringen Probekörperabmessungen üblicher Kriechversuche besonders gravierend. Zusammenfassend ist zu bemerken, daß Vergleiche von Kriechversuchen bei erhöhten Temperaturen an unversiegeltem Beton nur bei genauer Kenntnis und Berücksichtigung der Probekörpergeometrie und des Aufheizvorganges vorgenommen werden können. Nur dann sind die Einflüsse von Temperatur und Feuchte objektiv auswertbar.

Auch Maréchal's Versuche /43, 44/ gehen der Bedeutung der Feuchtebedingungen für die Temperaturabhängigkeit des Kriechens nach. Er stellte drei Feuchtebedingungen gegenüber: versiegelt, unversiegelt, vorgetrocknet bei  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zuvor waren die prismatischen Betonproben ( $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$ ) ein Jahr lang bei 20/95 gelagert worden. Die Aufheizung erfolgte in allen drei Fällen mit  $0,25 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$ . Vor der Belastung wurden die Probekörper 14 d auf der Prüftemperatur gehalten. Bild 24 zeigt Maréchal's Ergebnisse für unversiegelte und vorgetrocknete Proben. Außerdem sind in diesem Bild Kriechversuche an austrocknendem Beton von Nasser und Marzouk /50/, England und Ross /18/ und Hickey /34/ dargestellt. In allen Fällen wurden prismatische bzw. zylindrische Probekörper mit einem Druckmesser von 7 - 11 cm und einer Höhe von 23 - 30 cm verwendet. Das Belastungsalter betrug zwischen 10 d /18/ und 365 d /43/. Die Versuche unterscheiden sich wesentlich in der zeitlichen Abfolge von Aufheizung und Belastung. Während die Proben der Versuche von Maréchal und Nasser vor der Belastung rd. 14 Tage im aufgeheizten Zustand blieben, belastete England bereits 24 h nach der Aufheizung. Hickey heizte die Proben erst nach Belastung auf.

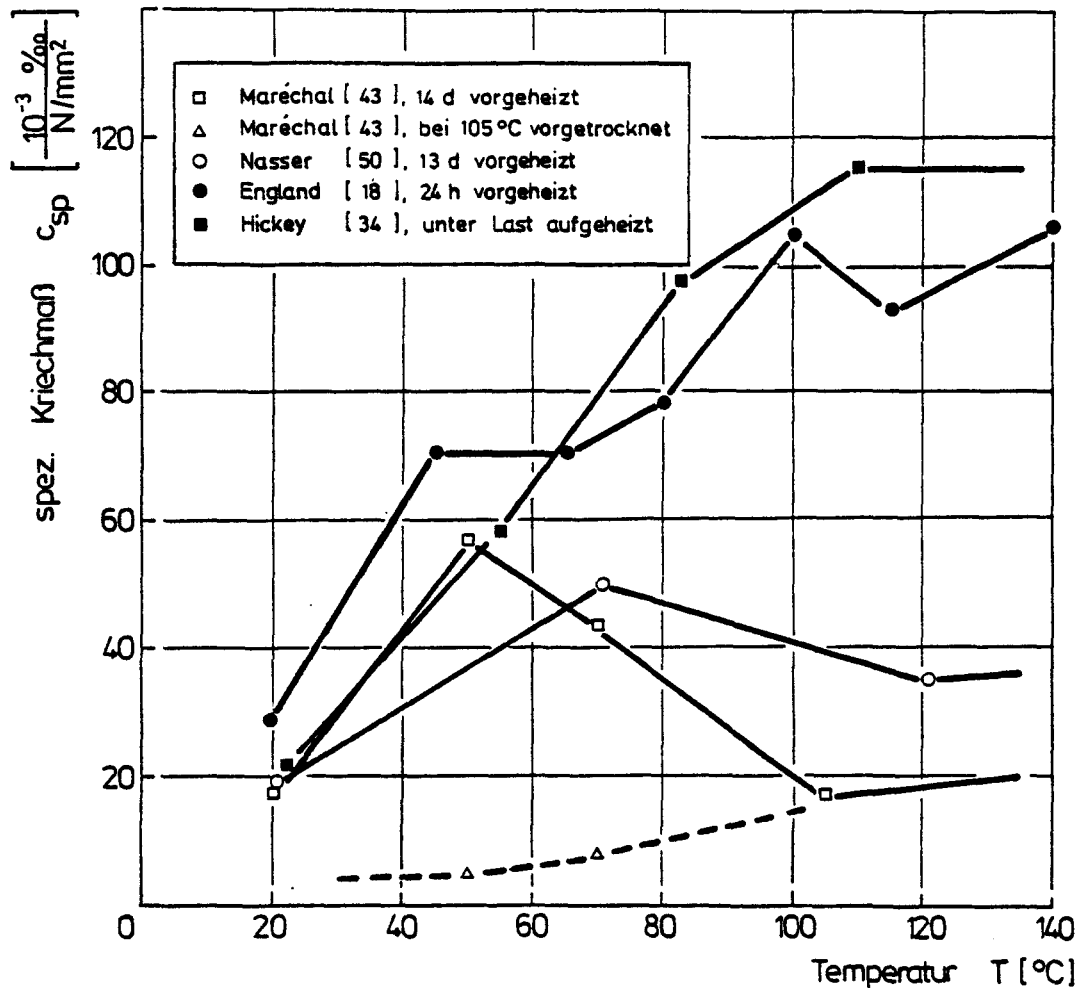


Bild 24 : Spezifisches Kriechmaß von unversiegeltem Beton als Funktion der Temperatur nach ca. 60-80 d Belastungsdauer

Mit steigender Prüftemperatur wird das verdampfbare Wasser zunehmend ausgetrieben. So zeigt Bild 24, daß bis ca. 50 °C trotz unterschiedlicher Temperaturhaltezeiten vor der Belastung ein etwa einheitliches Bild vorliegt, höhere Temperaturen jedoch im Fall der längeren Haltezeiten zu einem Rückgang der Kriechverformungen und zu einer Angleichung an die Kurve bei 105 °C vorgetrockneter Proben führen. Bei hoher Betonfeuchte ist die Temperaturabhängigkeit des Kriechens sehr ausgeprägt, bei trockenem Beton ist hingegen nur eine geringere Temperaturabhängigkeit bemerkbar.



Bild 25 zeigt anhand von Versuchen von Geymayer /22/ den Einfluß der Austrocknung infolge erhöhter Temperatur auf die Betonkriechverformungen. Geymayer untersuchte versiegelte und unversiegelte Betonzylinder ( $d = 10 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ) bei  $20^\circ\text{C}$  und  $120^\circ\text{C}$ . Über die Betonzusammensetzung, das Belastungsalter, den Belastungsgrad und die Lagerungsbedingungen macht er keine Angaben. Die Probekörper wurden nach der Aufheizung 18 h auf Prüftemperatur gehalten, bevor sie belastet wurden. Bereits nach ca. 20 d Belastungsdauer sind die Kriechverformungen für die unversiegelt erwärmten Proben weitgehend abgeklungen. Die Proben der übrigen Versuchsvarianten weisen auch nach 300 d Belastung noch deutliche Kriechgeschwindigkeiten auf.

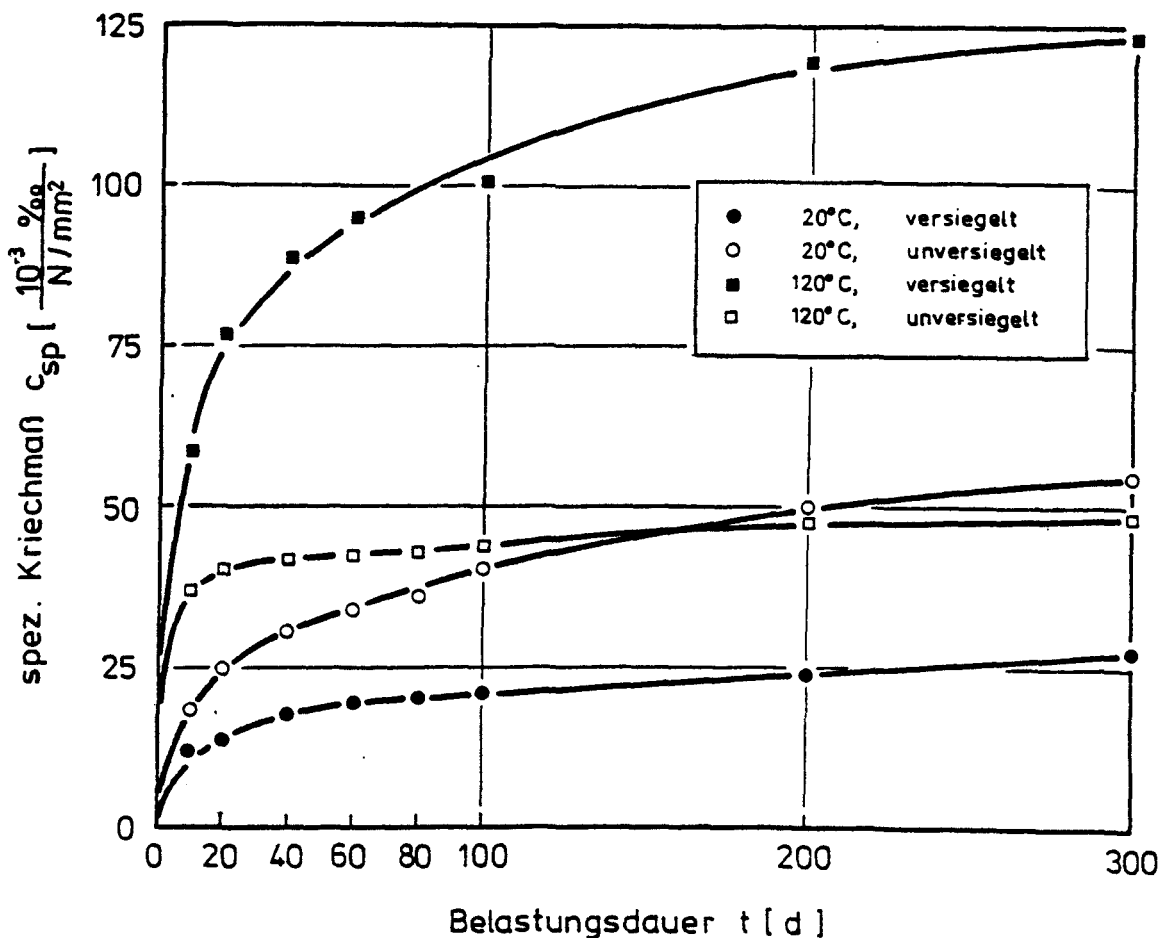


Bild 25 Spez. Kriechmaß von versiegeltem und unversiegeltem Beton bei erhöhter Temperatur, nach [ 22 ]

Bei der Betrachtung des Kriechens unversiegelten, erwärmten Betons wird dem Feuchteniveau, auf welches der Beton im Versuch austrocknet, wenig Beachtung geschenkt. Unter der Annahme, daß aus Probekörpern üblicher Abmessungen beim Einwirken nur mäßig erhöhter Temperaturen recht rasch das gesamte verdampfbare Wasser entfernt wird, ist dies berechtigt. Voraussetzung dafür ist, daß die Umgebungsluft trocknen kann, denn nur dann wird ein Dampfkonzentrationsgefälle als Antrieb aufrechterhalten. Bleibt in der Umgebungsluft hingegen eine nennenswerte Feuchte zurück, trocknet auch der Beton nur teilweise aus.

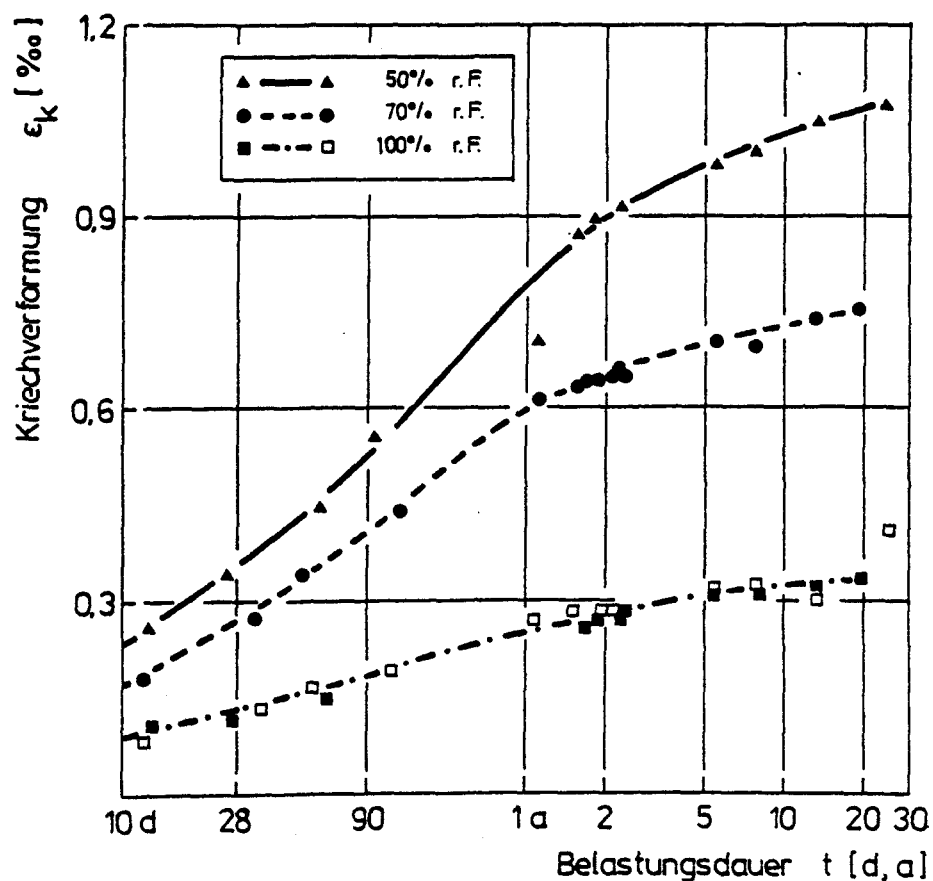


Bild 26 : Kriechverformungen von Beton bei 20°C bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten, nach [ 56 ]

Bei Normaltemperatur wurden entsprechende Versuche z.B. von Neville /56/ durchgeführt. Er machte Kriechversuche an Betonzyklindern (10 x 35 cm), die 28 d wassergelagert wurden und sich anschließend, im belasteten Zustand, an Luft mit 50, 70 bzw. 100 % r.F. befanden (s. Bild 26). Erwartungsgemäß zeigten die Proben bei 50 % r.F. die höchsten Kriechverformungen infolge der größten Anteile an "Trocknungskriechen", gegenüber jenen bei 100 % r.F., die vermutlich nur wenig Wasser abgaben. Entsprechende Versuche bei erhöhten Temperaturen sind nicht bekannt.

### **3.3.3 Erhöhte Temperatur im instationären Zustand**

Verglichen mit dem Kriechen bei stationär einwirkender erhöhter Temperatur ist der Kenntnisstand über die Kriechverformungen von Beton, der unter Last Temperaturänderungen erfährt, gering.

Erste Versuche zu dieser Problematik wurden 1966 von Hansen und Eriksson /31/ durchgeführt. Sie maßen die zeitabhängigen Durchbiegungen von Mörtelbalken (2 x 5 x 40 cm) unter sich zeitlich verändernder Temperatur. Die Balken waren in den Drittelpunkten mit insgesamt 33 % der Bruchlast belastet. Die Balken waren zuvor 28 d wassergelagert worden. Auch während der Kriechversuche befanden sie sich im Wasser. In Bild 27 sind die Kriechdurchbiegungen für 5 Temperaturfälle abhängig von der Belastungsdauer dargestellt. Der Vergleich der Kurve 3 mit Kurve 5 zeigt die kriecherhöhende Wirkung der Aufheizung unter Last. Außerdem zeigt sich, daß die Kriechverformungen mit zunehmender Aufheizgeschwindigkeit ansteigen (Kurve 2). Ein Aufheizzyklus vor der Belastung (Kurve 4) reduziert die nachfolgenden Kriechverformungen.

Wie die Kurven 2 bis 5 erkennen lassen, beeinflussen die Temperierungs- und Belastungsvariationen die anfänglichen Kriechgeschwindigkeiten beträchtlich. Aber bereits nach ca. 2-wöchiger Belastungszeit ist der Kriechzuwachs unter nunmehr stationärer Temperatur nahezu identisch. Die Kriechkurve der Serie 1 für häufige Temperaturzyklen zeigt hingegen eine anhaltend höhere

Kriechgeschwindigkeit. In dieser Serie waren unmittelbar nach der Belastung 3 Temperaturzyklen durchgeführt worden, anschließend blieb die Temperatur für eine Woche auf 20 °C. Dann folgten auf 2 Zyklen eine 5-tägige Frist bei 20 °C und wiederum 2 Zyklen. Danach wurden jeweils in 5 Tagen 10 Zyklen durchgeführt, gefolgt von einer mehrtägigen Pause bei 20 °C. Hansen beobachtete, daß die anfangs direkt aufeinander folgenden 3 Zyklen einen mit jedem Zyklus stark abnehmenden Durchbiegungszuwachs bewirkten, nach einer Woche bei 20 °C jedoch ein neuer Zyklus wiederum einen wesentlichen Durchbiegungszuwachs brachte.

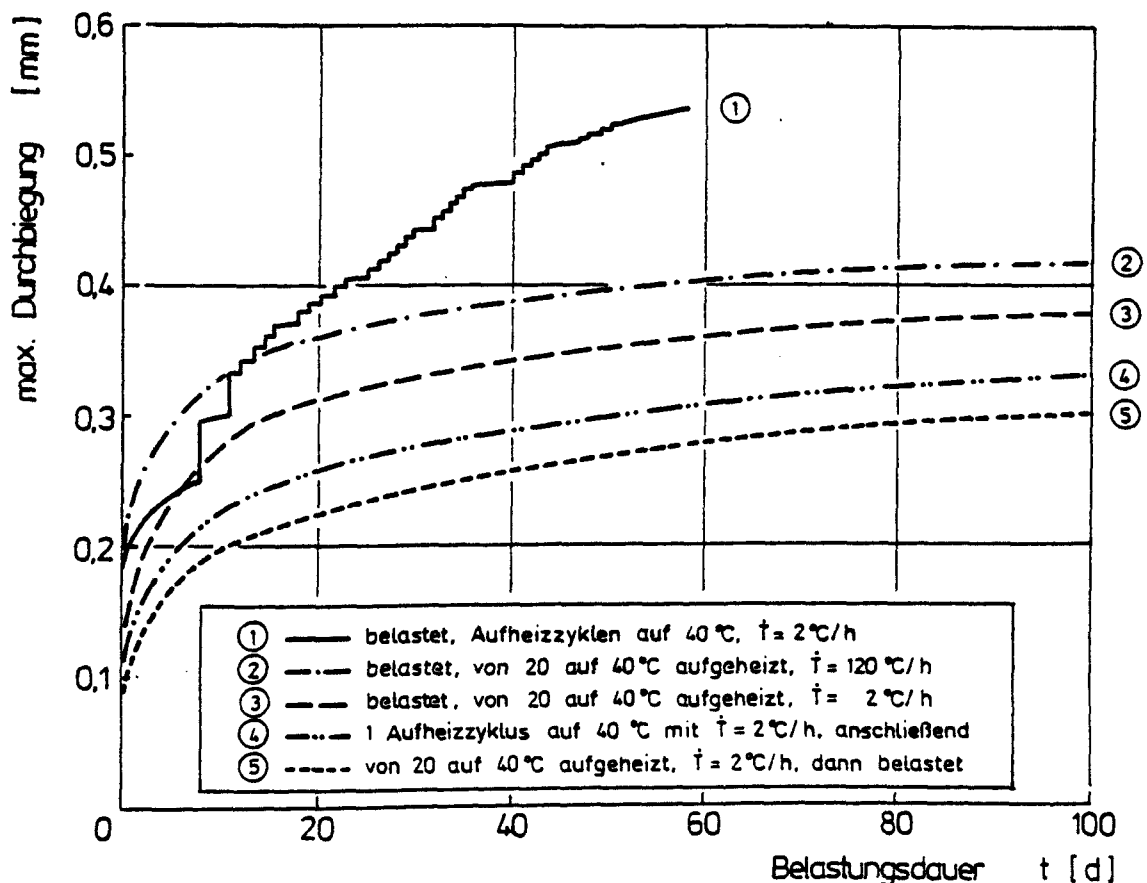


Bild 27 : Kriechdurchbiegungen von Pz-Mörtelbalken in Funktion der Belastungsdauer für verschiedene Temperaturwechsel unter Last, nach [ 31 ]

Hansen erklärt die aufgezeigten Beobachtungen als Folgen eines inneren Diffusionsvorganges adsorbierter Wassermoleküle aus Gelporen in Kapillarporen. Er vergleicht die Wirkung von Temperaturwechseln unter Last mit denen von Entfeuchtungen des Zementsteins /29/. Durch die thermisch aktivierte Verlagerung adsorbierten Zwischenschichtwassers in Porenbereiche, die keine kriechbeeinflussende Rolle spielen, steigt die Verformbarkeit des Gels. In nachfolgenden Zeiten bei Normaltemperatur ist dieser Vorgang aufgrund der Gelverformungen nur teilweise reversibel. Weil die Probekörper klein sind und Vergleichsversuche an Zementstein ähnliche Ergebnisse erbrachten, schließt Hansen Temperaturgradienten und thermische Unverträglichkeit zwischen Zementstein und Zuschlag als Ursachen aus.

Hansens Versuche eignen sich nicht, quantitativ verwertbare Schlüsse auf das Verhalten von Beton unter praktischen Beanspruchungen zu ziehen. Sie zeigen aber die Bedeutung instationärer Temperaturen für das Kriechen.

Illston und Sanders /38/ und Thelandersson /85/ führten Versuche unter Torsionsbeanspruchung durch. Versuche dieser Art bereiten Schwierigkeiten hinsichtlich der Übertragbarkeit auf das Druckkriechen. Die Vorteile einer Torsionsbeanspruchung oder auch Biegung bestehen darin, daß die Kriecheffekte ohne die Berücksichtigung thermisch oder hygriisch bedingter Volumenänderungen betrachtet werden können. Von Nachteil ist aber die Spannungsgradienten. Daß das Kriechverhalten unter Torsion physikalisch dem unter Druck entspricht, kann nach /20, 74/ nur für Normaltemperatur angenommen werden.

Illston und Sanders /38/ setzten wassergelagerte Mörtel-Hohlzylinder (1 : 2 : 0,45) einer Torsion und Temperaturen bis 94 °C aus. Die Hohlzylinder waren außen versiegelt und innen mit Wasser gefüllt. Sie wurden auch vom Hohlraum beheizt. Das Mörtelalter betrug bei erstmaliger Belastung bzw. Aufheizung zwischen 40 und 60 Tagen.

Illston und Sanders gelangten zu folgenden Schlüssen:

- Das Kriechen von Beton oder Mörtel bei konstanter, erhöhter Temperatur weist sowohl einen verzögert-elastischen Anteil als auch einen Fließanteil auf. Die Höhe der verzögert-elastischen Dehnung ist von der Temperaturhöhe abhängig und vom Belastungsalter unabhängig, allerdings entwickelt sie sich mit zunehmendem Belastungsalter langsamer. Die Fließdehnungen sind eine Funktion der Temperatur. Ihre Geschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Alter ab, ist jedoch nicht belastungsaltersabhängig.
- Sowohl während der Aufheizung unter Last als auch in einem bestimmten Zeitraum danach werden die Kriechverformungen stark beschleunigt (s. Bild 28). Anschließend ist die Kriechgeschwindigkeit etwa gleich hoch wie bei stationärer Temperatur. Der Temperaturanstieg bewirkt eine additive Kriechverformungskomponente, das "transitional thermal creep" als i.w. irreversiblen Anteil. Eine Abkühlung unter Last bewirkt keine spontane Änderung der Kriechgeschwindigkeit, sondern die Kriechverformung entwickelt sich gemäß der für diese Temperatur und dieses Alter zu erwartenden Fließkurve. "Transitional thermal creep" findet also nur bei Temperaturerhöhung statt.
- "Transitional thermal creep" tritt nur beim erstmaligen Aufheizen auf ein bisher unerreichtes Temperaturniveau auf. Zyklische Temperaturbeanspruchung erzeugt keinen weiteren Zuwachs. Das "transitional thermal creep" ist beim Aufheizen in mehreren Schritten von gleicher Größe wie beim Aufheizen in einem gesamten Schritt.

Bild 29 zeigt schematisch die nach Illston und Sanders unter instationärer Temperatur zu erwartenden Komponenten des Kriechens. Illston und Sanders entwickeln auf Basis ihrer Versuche ein Vorhersageverfahren für Kriechverformungen unter instationären Temperaturen und zwar für Torsionsbeanspruchung von Mörtel-Hohlzy-

lindern /39/. Sie gehen dabei von der Annahme aus, daß die Verformungen mit den vier voneinander unabhängigen, superponierbaren Anteilen elastische Dehnung, Fließdehnung, verzögert-elastische Dehnung und "transitional thermal creep" ausdrückbar sind.

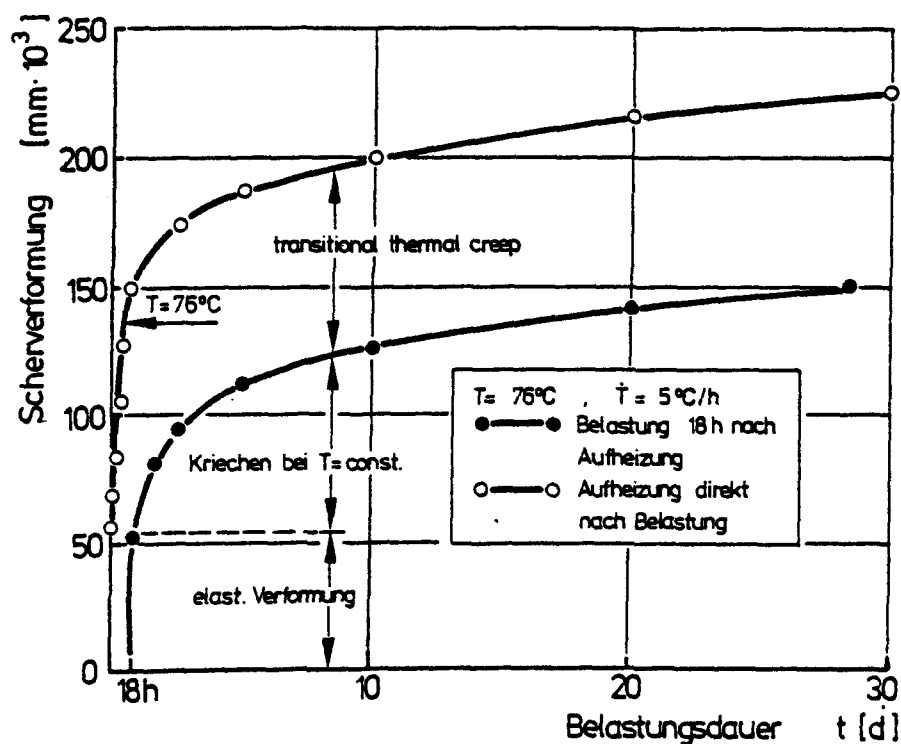


Bild 28: Scherverformungen torsionsbeanspruchter Mörtelholzzylinder bei unterschiedlicher Folge von Temperatur und Belastung; nach [ 38 ]

Illstons und Sanders Verfahren beruht ausschließlich auf eigenen Ergebnissen. Es wird von ihnen nur an diesen Ergebnissen überprüft. Es ist, da es keinerlei stoffmechanische Gesetzmäßigkeiten

zugrundelegt, nur für diesen Spezialfall (torsionsbeanspruchte Mörtelproben, Vorlagerung und Prüfung im gesättigten Zustand, Belastungsalter  $\tau_0 \geq 40$  d, Belastungsdauer  $\leq 90$  d usw.) zuverlässig. Außerdem benötigt das Verfahren Eingangswerte, die aus vorgeschalteten Kriechversuche ermittelt werden müssen.

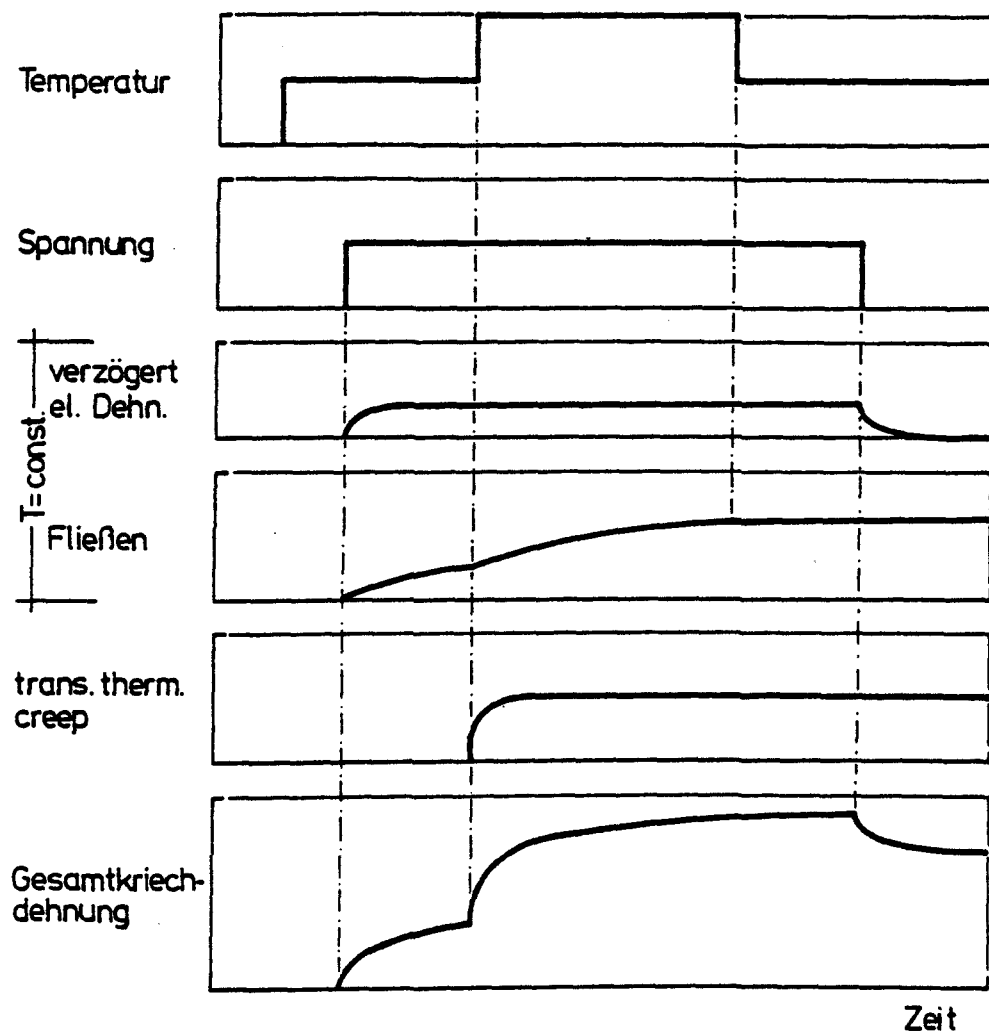
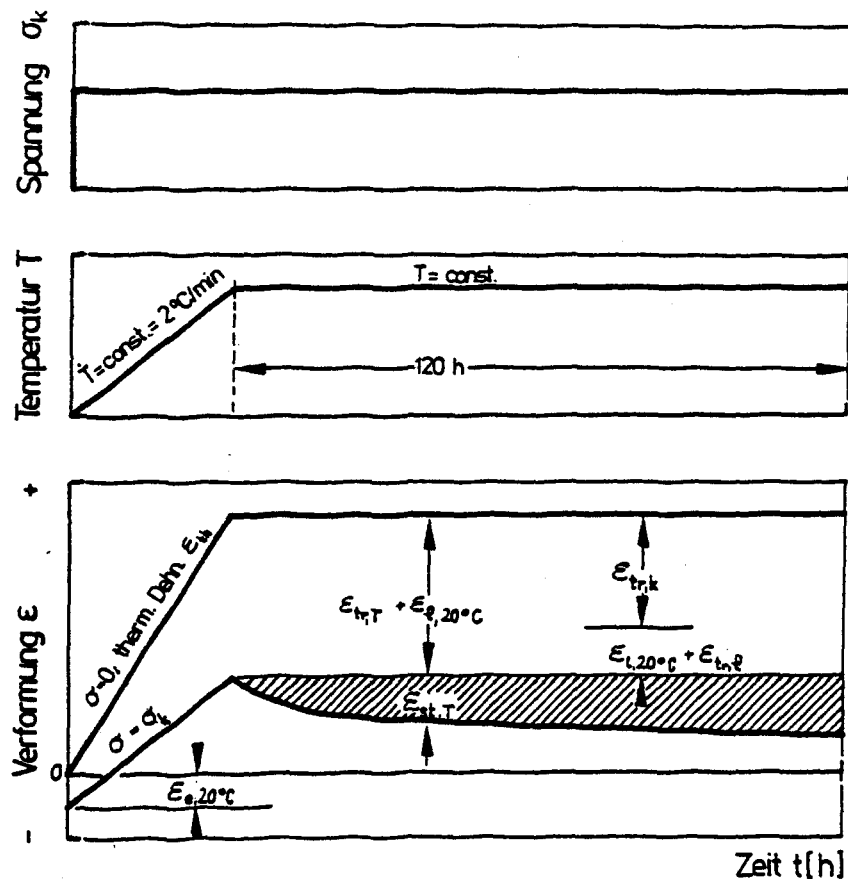


Bild 29 : Kriechverformungskomponenten bei instationärer Temperaturbeanspruchung ; nach [ 38 ]



Thelandersson verwendete in seinen Torsionskriechversuchen /85/ Betonvollzylinder ( $d = 15 \text{ cm}$ ). Thelanderssons Versuche gehören zum Problemkreis "Brandverhalten von Betonkonstruktionen". Er untersuchte deshalb hohe Temperaturen (bis  $500^\circ\text{C}$ ), hohe Aufheizgeschwindigkeiten ( $2 - 8^\circ\text{C}/\text{min}$ ) und kurze Beobachtungsdauern (bis  $5 \text{ h}$ ). Somit sind seine Erkenntnisse für den hier betrachteten Beanspruchungsbereich nur begrenzt verwendbar. Wie auch Illston und Sanders sieht Thelandersson in der zusätzlichen Kriechverformung die bei Aufheizungen unter Last entsteht, einen gesondert zu behandelnden Verformungsanteil. Dieser Verformungsanteil, von ihm "transient creep" genannt, entwickelt sich i.w. während der Aufheizung. Im Gegensatz zu den Versuchen von Illston und Sanders sind die Proben von Thelandersson weder versiegelt noch wassergesättigt. Das "transient creep" enthält also auch Trocknungskriechen während der Aufheizung. Die Ausgangsfeuchte und andere, den Feuchtehaushalt bestimmende Parameter untersuchte Thelandersson aber nicht.

Auch Schneiders Kriechversuche unter instationären, erhöhten Temperaturen dienten vorrangig der Erforschung des Hochtemperaturverhaltens von Beton für den Brandfall /77, 76, 79/. Um die Verformungen bei Aufheizung unter Last zu erfassen, wählte Schneider einen anderen Weg als z.B. Hansen und Illston. Er bezeichnet die Differenz der Verformungen eines unbelastet erwärmten und eines belastet erwärmten Probekörpers abzüglich der Kriechverformung nach Erreichen der Prüftemperatur und der elastischen Verformung bei  $20^\circ\text{C}$  als sog. "Übergangsverformung"  $\epsilon_{tr,T}$  (s. Bild 30).



- $E_{e,20^\circ\text{C}}$ : elast. Verformung durch  $\sigma_k$  bei  $20^\circ\text{C}$   
 $E_{st,T}$ : Kriechverformung nach Erreichen von  $T$ , bei  $T = \text{const.}$   
 $E_{tr,T}$ : „Übergangsverformung“ ( $E_{tr,T} = E_{tr,e} + E_{tr,k}$ )  
 $E_{tr,e}$ : elast. Verformung durch E-Modul-Änderung während  $\dot{T} = \text{const.}$   
 $E_{tr,k}$ : Übergangskriechen, während  $\dot{T} = \text{const.}$  entstehend

Bild 30 : Versuchsablauf zur Bestimmung von „Übergangsverformungen“, nach [ 77 ]

Dabei nimmt er an, daß sich diese "Übergangsverformung" aus einem zusätzlichen elastischen Anteil, der aus der thermisch bedingten Änderung des E-Moduls errechnet wird, und dem eigentlichen "Übergangskriechen" zusammensetzt. Nach Schneiders Definitionen entwickeln sich die "Übergangsverformungen" also nur während des Aufheizvorganges.

Schneiders Ergebnisse bestätigen, daß während einer Aufheizung unter Last große Verformungen entstehen. Der von ihm in Bild 30 als stationäre Kriechverformung  $\epsilon_{st,T}$  bezeichnete Anteil entspricht jedoch nicht den Kriechverformungen, die sich im Ablauf eines Kriechversuchs bei Aufheizung vor Belastung entwickeln. Als stationäre Kriechverformung bezeichnet er jene Verformung, die nach Abschluß der Aufheizung unter der dann stationären Temperatur entsteht. Die erste Zeit nach Erreichen der Prüftemperatur ist aber nach Hansen und Illston noch durch erhöhte Kriechgeschwindigkeiten geprägt.

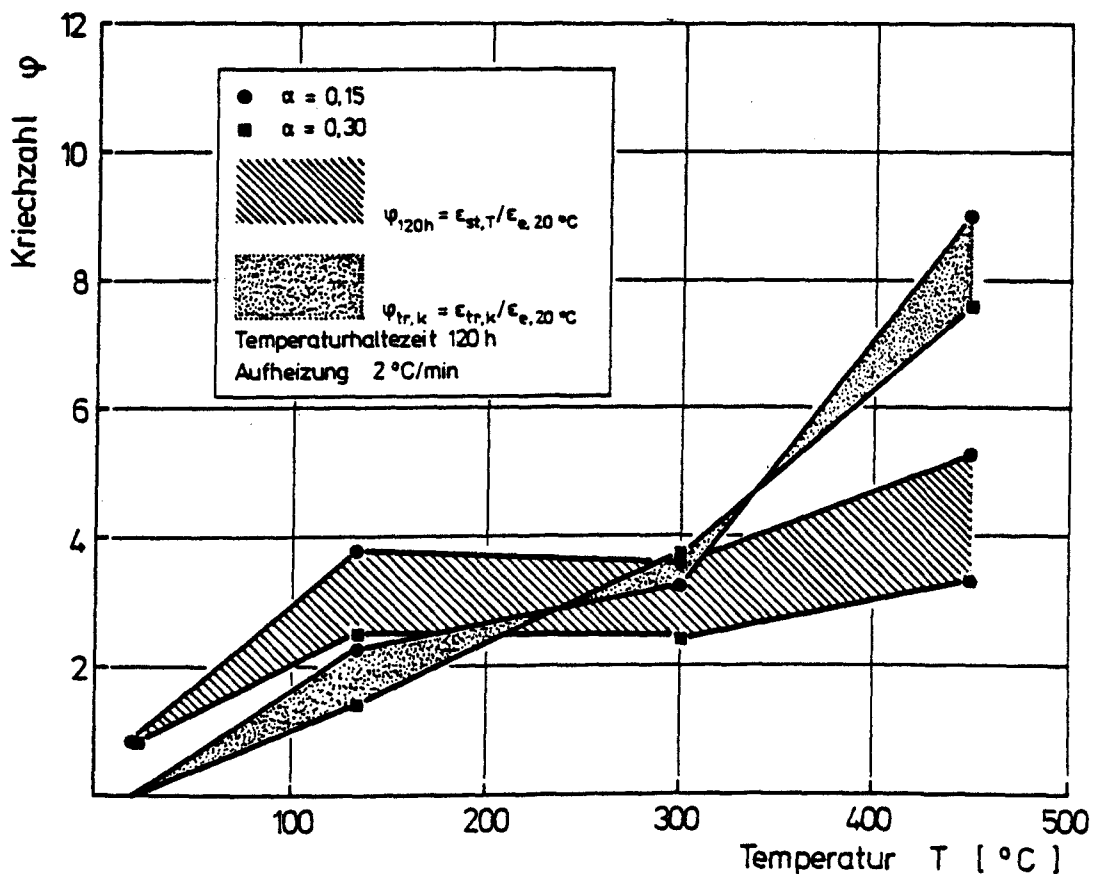


Bild 31 : Kriechzahl  $\phi$  , bezogen auf die elastische Verformung bei  $20^\circ C$  , nach [ 77 ]

Schneider ermittelt dann aus der Kriechverformung nach 120 h unter konstanter Temperatur und dem sich aus dem Aufheizvorgang ergebenden "Übergangskriechen" Kriechzahlen, indem er diese Verformungen auf die elastische Verformung bei 20 °C bezieht (Bild 31). Diese Auswertung ist geeignet, temperaturabhängig aufzuzeigen, in welchem Verhältnis die Verformung während der Aufheizung zu der nach der Aufheizung steht. Der Vergleich mit Kriechzahlen, die in einem konventionellen, stationären Kriechversuch ermittelt wurden, ist aber nicht möglich.

Fahmi, Polivka und Bresler /19, 20/ untersuchten den Einfluß instationärer Temperaturen bis 60 °C, auch bei zyklischer Einwirkung, sowie der relativen Feuchtigkeit (50 und 100 %) auf das Kriechen unter Druck- und Torsionsbeanspruchung. Sie verwendeten Mörtel-Hohlzylinder (1 : 2 : 0,58 GT), die nach Herstellung zunächst 18 d feucht und bis zur Prüfung weitere 14 bis 21 d bei 50 bzw. 100 % r.F. lagerten. Vor der ersten Temperaturerhöhung standen die Proben bereits mindestens 37 d bei 20 °C unter Last. Der Belastungsgrad betrug 32 %. Während des Kriechversuchs waren die Proben unversiegelt. Aufheizung und Abkühlung fanden in jeweils 3 h statt. Parallel zu den Versuchen unter Druckbeanspruchung wurden die Temperatur- und Schwinddehnungen an unbelasteten Begleitkörpern gemessen. Bild 32 zeigt die elastischen und Kriechdehnungen druckbeanspruchter Proben unter konstanter und zyklischer Temperatureinwirkung bei 50 bzw. 100 % Ausgangsfeuchte.

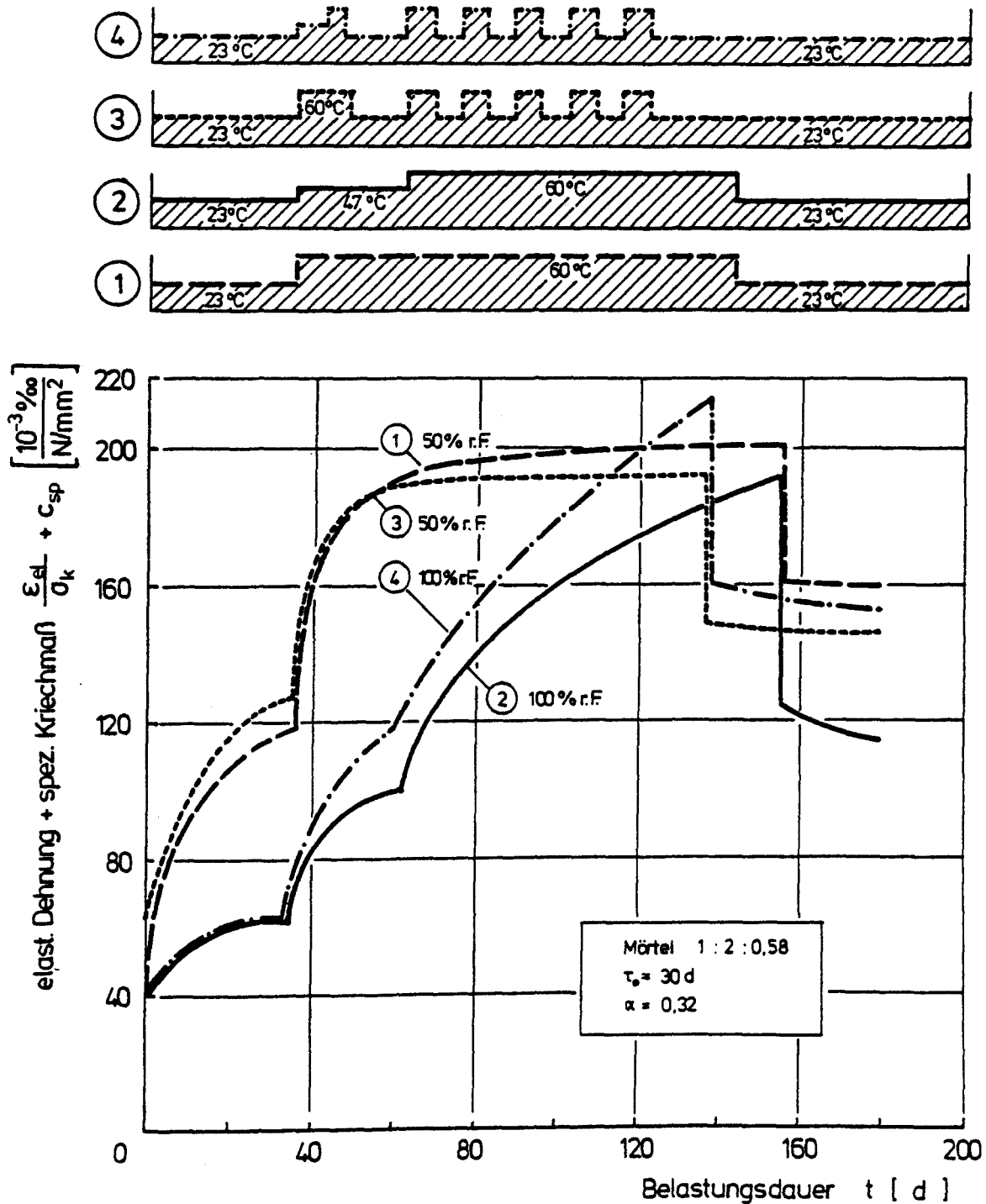


Bild 32 : Kriechverformungen bei konstanter und zyklischer Belastung im instationären Temperaturfall ; nach [ 20 ]

Fahmi et al kamen zu folgenden Erkenntnissen:

- Beim erstmaligen Aufheizen auf  $60^{\circ}\text{C}$  tritt eine starke Kriechbeschleunigung auf. Als Ursache hierfür werden Strukturänderungen im Zementgel angegeben, die insbesondere den elastischen Dehnungsanteil vergrößern.
- Nachdem die Prüftemperatur erreicht ist, klingt in den 50 % r.F.-Proben das Kriechen rasch ab, während die bei 100 % r.F. vorgelagerten Proben weiterhin eine Zunahme des Kriechens aufweisen. Fahmi et al führten dies darauf zurück, daß die trockeneren Proben schon bald ihr bei  $60^{\circ}\text{C}$  verdampfbare Wasser abgegeben haben, die feuchten Proben hingegen noch langfristig Trocknungskriechen zeigen.
- Bei zyklischer Temperatureinwirkung ist für 50 % r.F.-Proben nach dem ersten Zyklus keine weitere Kriechzunahme zu beobachten. Auch bei 100 % r.F. vorgelagerte Proben reagieren auf den ersten Zyklus mit Kriechverformungen, deren Größe in keinem der nachfolgenden Zyklen wieder erreicht werden. Allerdings bewirken hier die Zyklen gegenüber konstanter Temperatureinwirkung eine anhaltend hohe Kriechgeschwindigkeit.
- Torsion führt, auf die Spannungseinheit bezogen, zu höheren Kriechverformungen als einaxialer Druck.

Im Rahmen von Kriechversuchen unter stationärer erhöhter Temperatur wurden verschiedentlich auch Tastversuche bei instationären Temperaturen durchgeführt /28, 58, 4, 88/.

Hannant /28/ senkte während eines "stationären Kriechversuchs bei ca.  $58^{\circ}\text{C}$  an versiegeltem Kalksteinbeton die Temperatur nach etwa 300-tägiger Belastungsdauer 12 mal unter Last auf  $27^{\circ}\text{C}$  ab. Weder während der Temperaturzyklen noch während der anschließenden Beobachtung des Probekörpers stellte er eine spürbare Kriechbeschleunigung fest.

Nishizawa /58/ belastete versiegelte Betonprismen (15 x 15 x 55 cm) im Alter von 28 d mit ca. 30 % der 28 d-Festigkeit bei 20 °C. Nach 7 Tagen heizte er auf 70 bzw. 90 °C auf (s. Bild 33). Er stellte fest, daß die Kriechverformungen während der Aufheizung rasch anstiegen und nach ca. 1 Woche merklich abklangen. im weiteren Verlauf zeigten sich höhere Kriechgeschwindigkeiten als bei 20 °C, wobei die Kriechverformungen proportional zum Logarithmus der Zeit anstiegen. Bild 34 zeigt Nishizawas Ergebnisse für zyklische Temperatureinwirkungen auf unter Wasser gelagerte Proben. Er stellte fest, daß der Temperaturanstieg im ersten Zyklus die weitaus größte Kriechverformung verursacht. Wird in einem zweiten Temperaturzyklus eine höhere Temperatur (70 °C) als im ersten (40 °C) erreicht, so bewirkt auch dieser eine hohe Kriechgeschwindigkeit.

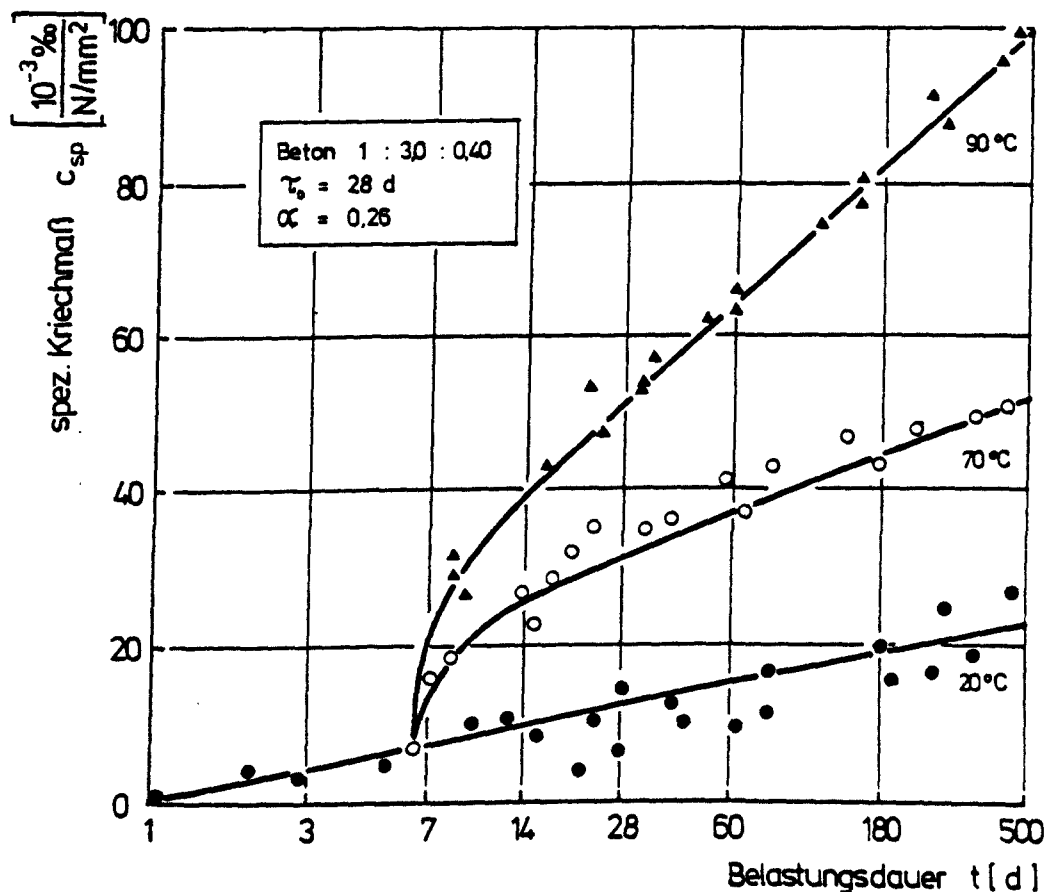


Bild 33 : Spez. Kriechmaß versiegelt aufgeheizten Betons;  
nach [ 58 ]

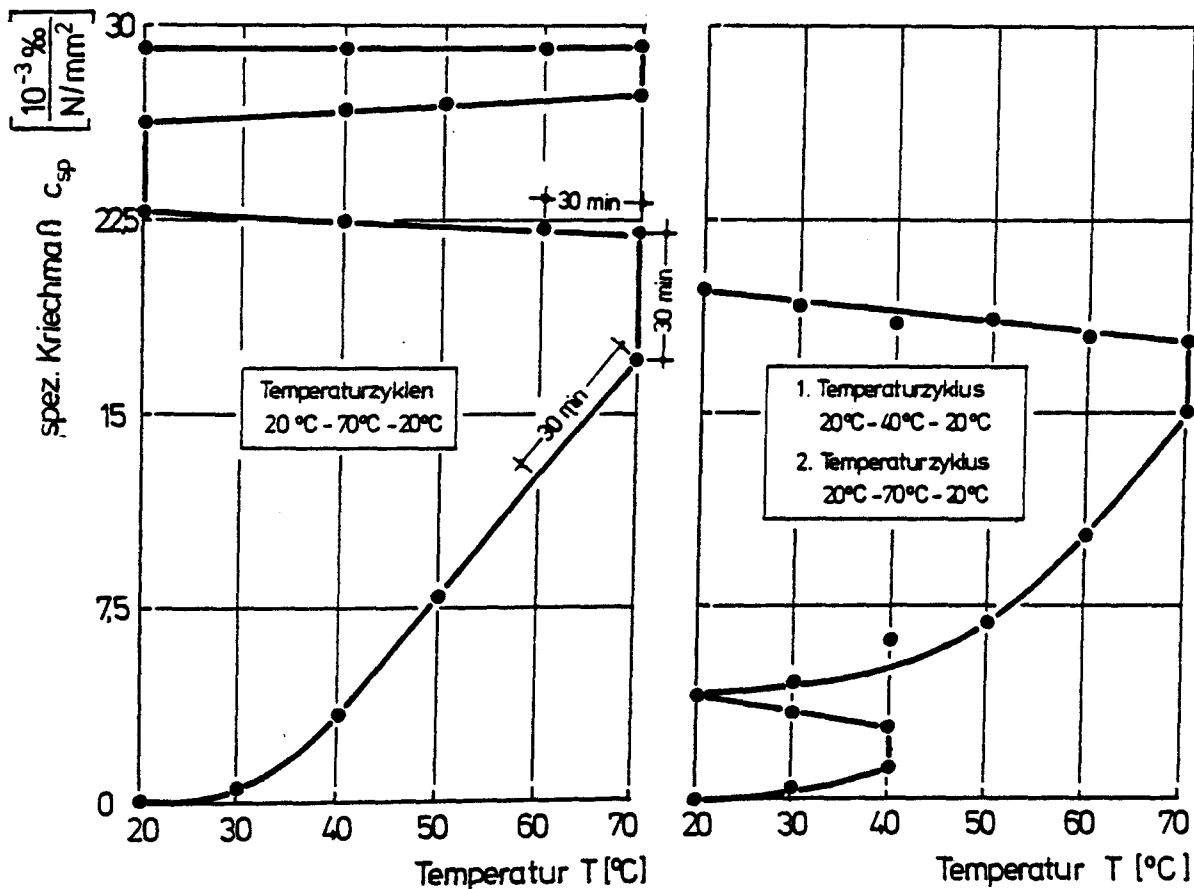


Bild 34 : Spez. Kriechmaß wassergesättigten Betons während Temperaturzyklen; nach [ 58 ]

Arthanari und Yu /4/ stellten fest, daß bei schrittweisem Aufheizen höhere Kriechverformungen entstehen als bei Aufheizung in einem Gesamtschritt. Nach Wallo et al /80/ führen sowohl Temperaturerhöhungen als auch -absenkungen zu einem Kriechanstieg.

Parrott /64/ führte Kriechversuche bei instationärer Temperatur an Zementstein ( $W/Z = 0,47$ ) durch. Die prismatischen Versuchskörper ( $1,2 \times 1,2 \times 11$  cm) wurden vor und während der Belastung, sowie während aller Temperaturbeanspruchungen unter Wasser gelagert. Die Temperaturänderungen wurden mit  $\dot{T} = 8$  °C/h durchgeführt, die maximale Temperatur betrug 60 °C. Parrott untersuchte



zwei Belastungsalter ( $\tau_0 = 28 \text{ d}$  und  $189 \text{ d}$ ), die Aufheizung fand jeweils  $14 \text{ d}$  später statt. Die während und nach der Aufheizung gemessene Kriechverformung für vier unterschiedliche Kombinationen von Aufheizalter und Belastungsalter sind in Bild 35 dargestellt.

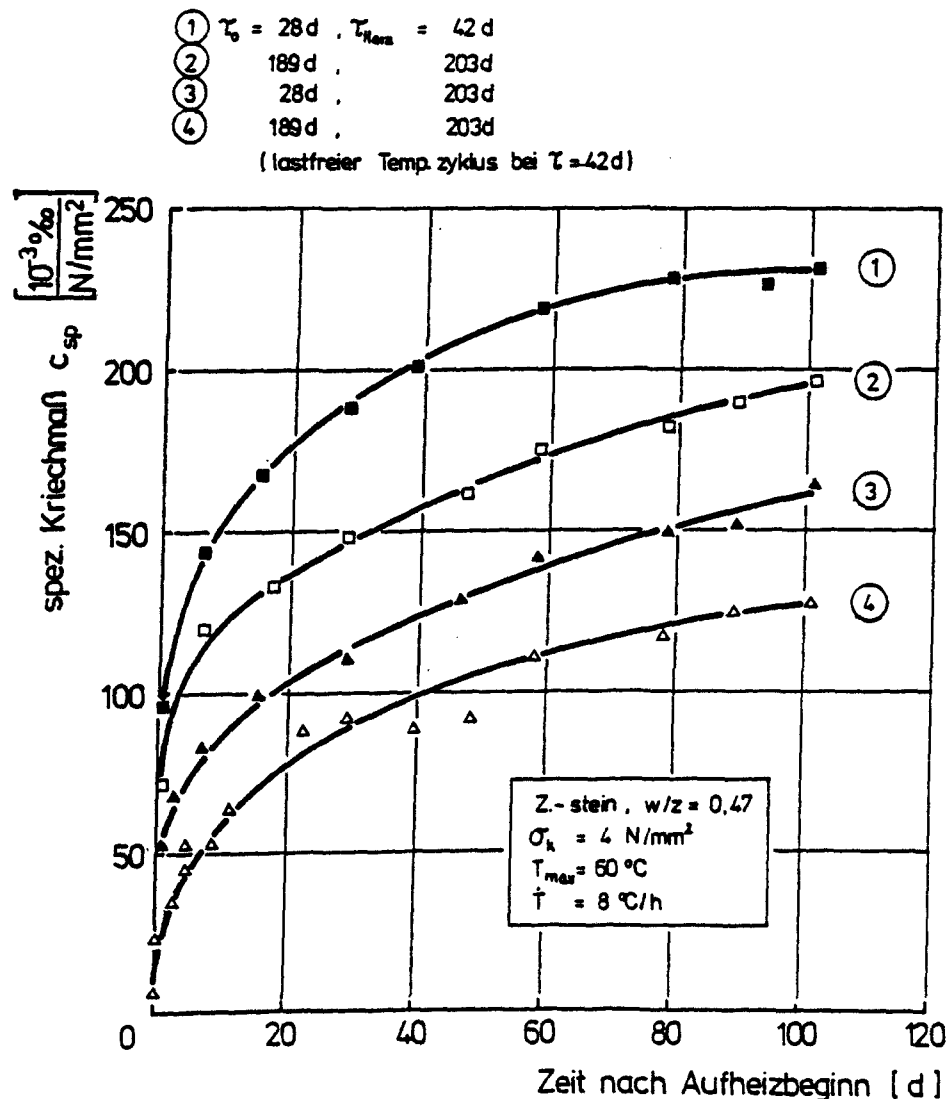


Bild 35 : Spez. Kriechmaß von wassergesättigtem Zementstein bei Aufheizung auf  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; nach [ 64 ]

Der Vergleich der Kurven 1 und 2 zeigt die kriechverringende Wirkung höheren Belastungsalters, der Vergleich der Kurven 2 und

4 die ebenfalls verringernde Wirkung eines vorhergehenden, lastfreien Temperaturzyklus'. Wird Kurve 3 der Kurve 1 gegenübergestellt, so ist zu erkennen, daß eine spätere Erstaufheizung ebenfalls zu geringeren Kriechverformungen führt. Die Abnahme der Kriechgeschwindigkeit in Serie 1 ca. 60 d nach der Aufheizung ist darauf zurückzuführen, daß zu diesem Zeitpunkt eine Abkühlung auf 20 °C stattfand, während die übrigen Serien bei 60 °C blieben.

Parrott ging bei der Auswertung seiner Versuche von Illstons und Sanders' /38, 39/ Annahme aus, daß die irreversible Kriechverformung während eines erstmaligen Aufheizvorganges durch die zwei Komponenten "Fließen" und "transitional thermal creep" gebildet werden. Das Fließen ist vorrangig durch die Temperaturhöhe geprägt. Das "transitional thermal creep" entwickelt sich nach Parrott im wesentlichen während der ersten 20 Tage: Danach herrschen, wie Bild 35 zeigt, ausgenommen Serie 1, etwa gleiche Kriechgeschwindigkeiten. Dies bestätigt, daß das "Fließen" hauptsächlich temperaturabhängig ist. Während Illston und Sanders feststellten, daß nur der erstmalige Aufheizvorgang große Kriechgeschwindigkeiten erzeugt, maß Parrott auch nach einem vorhergegangenen lastfreien Temperaturzyklus noch eine hohe Kriechgeschwindigkeit bei der Aufheizung unter Last. Allerdings folgte der ersten Aufheizung eine etwa 100-tägige "Erholungspause" bei 20 °C unter Wasser.

In einem Tastversuch heizte Parrott anstelle mit 8 °C/h mit 4 °C/min, also mit der 30-fachen Geschwindigkeit auf. Er registrierte ein etwa verdoppeltes "transitional thermal creep". Daraus schloß er, daß die Kriechgeschwindigkeit möglicherweise durch Mikrorißbildung beeinflusst wird. Werden niedrig belastete Proben mit hoher Geschwindigkeit aufgeheizt, so können nach Parrott temporäre Zugspannungen im Inneren der Proben eine Rißbildung verursachen, die die irreversible Verformung erhöht.

Zusammenfassende Darstellung des Kenntnisstandes zum Kriechen bei Temperaturerhöhung unter Last:

- 1) Die Aufheizung belasteter Körper führt zu einer größeren Kriechverformung, als wenn zuerst aufgeheizte Körper anschließend belastet werden. Die zusätzliche Kriechverformung wird als "transitional thermal creep" /38/, "transient creep" /85/ oder "Übergangskriechen" /76/ bezeichnet.
- 2) Diese zusätzliche Kriechverformung, im folgenden "transitional thermal creep" genannt, entwickelt sich während der Aufheizung und innerhalb der ersten 2 - 3 Wochen nach dem Erreichen der Prüftemperatur /31, 38, 85, 20, 58, 64/.
- 3) "Transitional thermal creep" entwickelt sich hauptsächlich /31, 20, 58, 64/ bzw. ausschließlich /38/ infolge Aufheizung auf eine vorher nicht erreichte Temperaturhöhe. Die Betonfeuchte scheint hier eine wichtige Rolle zu spielen /20/.
- 4) Zyklische Temperaturbeanspruchung von wassergelagerten Proben bewirkt kein Kriechen, daß jenes beim ersten Aufheizung deutlich übertrifft /58, 20, 38/. Liegen zwischen den Aufheizzyklen mehrtägige "Erholungspausen" bei Normaltemperatur, so ist neuer Kriechzuwachs zu erwarten /64, 31/.
- 5) Trocknen Proben während der ersten Aufheizung aus, so ist infolge nachfolgender Temperaturzyklen ohne Wiederbefeuchtung kein Kriechen zu erwarten /20/.
- 6) Durch ein schrittweises Aufheizen auf die Prüftemperatur wird eine höhere Kriechverformung erreicht als bei Aufheizung in einem Gesamtschritt /4/. Illston und Sanders stellten dies nicht fest /38/.

7) "Transitional thermal creep" tritt sowohl bei wassergelagerten Proben /31, 38, 64/ als auch bei trocknenden Proben auf /77, 85, 20/.

8) Torsion führt, auf die Spannungseinheit bezogen, zu höheren Kriechverformungen als einaxialer Druck /20/.

9) "Transitional thermal creep" findet nur bei Temperaturerhöhung statt, Abkühlung unter Last führt zu einem Rückgang der Kriechgeschwindigkeit auf das für diese Temperatur im stationären Fall erwartete Maß /38, 64/. Nach /88/ führen auch Abkühlungen zur Kriechbeschleunigung.

10) Beton, Mörtel und Zementstein zeigen bei Aufheizung unter Last ein qualitativ gleiches Verhalten.

11) "Transitional thermal creep" ist ein phänomenologischer Begriff, der bislang physikalisch nicht erklärt werden konnte.

### 3.3.4 Bewertung und offene Fragen

Mit zunehmender Temperatur steigt das Kriechen des Betons an. Bei 80 bis 90 °C wurden gegenüber 20 °C etwa 2- bis 4-fache Kriechverformungen gemessen. Die Streuung ist erheblich. In einigen Untersuchungen wurde im Temperaturbereich bis 100 °C für eine Temperatur zwischen 60 und 80 °C ein Maximum der Kriechverformungen nach Belastungszeiten bis ca. 100 d festgestellt. Als Gründe für dieses Maximum werden mögliche Phasenänderungen des Gelwassers oder Extremwerte der Viskosität dünner Wasserfilme in Abhängigkeit der Temperatur vermutet. Die meisten Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, daß die Kriechverformungen mit zunehmender Temperatur monoton ansteigen; teilweise wird ein linearer Zusammenhang vermutet. Insgesamt ergibt sich nach dem heutigen Kenntnisstand kein geschlossenes Bild zur Abschätzung der Temperaturabhängigkeit des Kriechens.

Übereinstimmend herrscht die Auffassung, daß der Einfluß der Feuchte bzw. der Feuchtwanderung in diesem Temperaturbereich von bestimmender Bedeutung für das Kriechen von Beton ist. Die Feuchtebedingungen in Betonbauteilen wurden in Kriechversuchen i.a. so simuliert, indem zum einen "versiegelte" Proben untersucht wurden und andererseits "frei austrocknende".

Je nach Betonzusammensetzung, Vorlagerung und versuchstechnischer Realisierung der Versiegelung ergeben sich aber für versiegelten Beton unterschiedliche Feuchtigkeiten. Mitunter ist auch an der Zuverlässigkeit von Versiegelungen zu zweifeln. Der tatsächliche Feuchtegehalt während des Kriechens wurde oft gar nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.

Kann Beton beim Kriechen austrocknen, kommen die Probekörpergeometrie und die Entfeuchtung im Zeitraum zwischen der Aufheizung und der Belastung als zusätzliche Parameter hinzu. Besonders dem letzten Aspekt und der Tatsache, daß Beton in der Realität bei Einwirkung erhöhter Temperatur i.a. weder völlig

"versiegelt" ist, noch zwangsläufig sein gesamtes verdampfbares Wasser abgibt, wurde bisher oft zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. So sind keinerlei Kriechversuche bekannt, in denen Beton bei erhöhter Temperatur definierte, verschieden hohe Feuchtigkeiten aufwies oder bei erhöhter Temperatur wechselnden Feuchtigkeiten ausgesetzt war.

Die Temperaturabhängigkeit des Kriechens läßt sich nach Einschätzung einiger Forscher mit Hilfe eines Ansatzes nach Arrhenius in Abhängigkeit der thermischen Aktivierungsenergie beschreiben. Da die Aktivierungsenergie ausgeprägt vom Feuchtezustand des Zementsteins abhängt, können Kriechversuche bei verschiedenen Feuchtigkeiten hier möglicherweise zu wichtigen Erkenntnissen verhelfen.

Wird Beton nicht zuerst aufgeheizt und im Anschluß belastet, wie in Kriechversuchen üblich, sondern zuerst belastet und dann unter Last aufgeheizt, wie es für reale Beanspruchungen ja zutreffender ist, entsteht während der Aufheizung und einige Zeit danach eine erhöhte Kriechgeschwindigkeit. Verglichen mit der Zahl der Kriechversuche bei "stationärer" Temperatur, hier sind jene Versuche gemeint, in denen bereits aufgeheizte Proben belastet wurden, ist die Anzahl der Kriechversuche, die für sog. "instationäre" Temperaturverhältnisse durchgeführt wurden, gering. In einigen der letztgenannten Versuche wurden die Proben Torsions- oder Biegebeanspruchung ausgesetzt. Diese Beanspruchungen bieten den Vorteil, Kriechverformungen frei von thermischen und hygrischen Verformungen messen zu können, die Übertragbarkeit auf für Kriechversuche übliche Druckbeanspruchungen ist aber sehr begrenzt. Unser heutiger Kenntnisstand über Kriechverformungen, die während und einige Zeit nach Aufheizung unter Last entstehen, ist entsprechend gering.

Sicher ist, daß die Betonfeuchtigkeit auch hier eine wichtige Rolle spielt. Trocknen die Proben nämlich bei der Aufheizung

unter Last aus, so ist bei nachfolgenden Temperaturänderungen kein deutliches Kriechen zu beobachten. Hauptsächlich entwickelt sich ein erhöhtes Kriechen ohnehin nur beim erstmaligen Aufheizen auf eine zuvor nicht erreichte Temperaturhöhe. Eine zyklische Temperaturbeanspruchung bewirkt nur dann ein verstärktes Kriechen, wenn zwischenzeitlich eine mehrtägige "Erholungspause" bei Normaltemperatur und Feuchtelagerung erfolgt.

Kriecheffekte von Beton bei erhöhter, instationärer Temperatur, im englischen Sprachgebrauch i.a. als "transitional thermal creep" bezeichnet, sind bis heute physikalisch nicht erklärbar. Ein Rechensatz zur Verformungsabschätzung, der auch nur die ohnehin unzureichende Zuverlässigkeit der für stationäre Temperatureinwirkung bekannten Rechenverfahren erreicht, ist nicht bekannt.

#### 4. FOLGERUNGEN FÜR KRIECHVERSUCHE

Die vorliegende Literatursichtung versucht, einen Überblick über jene Parameter zu geben, die das Kriechen des Betons bei erhöhter Temperatur bis ca. 100 °C wesentlich beeinflussen. Dabei wird nach jenen Einflüssen unterschieden, die

- die Struktur des Werkstoffes und seinen Zustand zu Beginn des Kriechens beschreiben.
- die Höhe und Dauer der Lasteinwirkung, sowie die Rückverformung nach Entlastung betreffen und die
- die thermisch-hygrischen Umgebungsbedingungen während des Kriechens beschreiben.

Die Aufgabe dieser Literatursichtung ist, aufzuzeigen, welche Einflußgrößen weiterer experimenteller Untersuchung bedürfen, um unter extremen klimatischen Verhältnissen zu erwartende Kriechverformungen besser einschätzen zu können. Hierzu im einzelnen:

- 1) Seitens der Betonzusammensetzung ist vor allem dem W/Z-Wert als derjenigen Größe, die die Zementsteinporosität bestimmend beeinflusst, Aufmerksamkeit zu schenken. Denn Feuchtehaushalt und Kapillarporosität stehen in engem Zusammenhang; sie sind bei erhöhter Temperatur von zunehmender Bedeutung. Die versuchstechnische Isolierung des W/Z-Wertes ist aber problematisch.
- 2) Der Einfluß der Zuschlagart scheint nicht sicher geklärt zu sein. Für die in Mitteleuropa wichtigen quarzitischen und calzitischen Zuschläge sind weitere Untersuchungen angezeigt, auch bei Zugabe von Flugasche zu Kalksteinbeton.
- 3) Temperatureinwirkungen vor der Belastung, also auch innerhalb des Zeitraumes im aufgeheizten Zustand vor der Belastung, beeinflussen die späteren Kriechverformungen erheblich. Hier



sollten systematische Untersuchungen vorgenommen werden. Vor allem sollte aber bei allen Kriechversuchen durch sorgfältige Erfassung dieses Parameters der Vergleich ermöglicht werden.

- 4) Aus der verzögert-elastischen Rückverformung nach Entlastung können wichtige Schlüsse gezogen werden, mit welchen Vorgängen im Werkstoff die kriecherhöhende Wirkung erhöhter Temperatur zusammenhängt. Sie muß bei jedem Kriechversuch gemessen werden.
- 5) Die Temperaturabhängigkeit des Kriechens ist eng mit der Feuchtigkeit des Betons verknüpft. Üblicherweise werden Probekörper für Kriechversuche eigenfeucht oder nach Wasserlagerung versiegelt oder aber sie trocknen unter Temperatureinwirkung frei aus. Systematische Untersuchungen zum Einfluß definierter, verschieden hoher, konstanter oder auch wechselnder Feuchtigkeit auf das Temperaturkriechen sind nicht bekannt. Sie sind aber für eine zutreffende Beschreibung des Kriechens unerläßlich.
- 6) Kriechprobekörper werden üblicherweise erst nach der Aufheizung belastet und nicht, der Realität entsprechend, erst im belasteten Zustand aufgeheizt. Die Kriechverformungen für diese beiden Fälle unterscheiden sich wesentlich, gesicherte Werte können aber nicht angegeben werden. Hier sind Untersuchungen dringend erforderlich.

## 5. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ ALDA, W.  
Zum Schwingkriechen von Beton  
Dissertation, TU Braunschweig, 1978
  
- /2/ ALTMANN, K.  
Das Verhalten von Beton bei Einwirkung von Feuchtigkeit  
Dissertation, TU Berlin, 1968
  
- /3/ ARTHANARI, S.; YU, C.W.  
An analysis of the creep and shrinkage effects upon pre-stressed concrete members under temperature gradient and its application  
Mag. of Concrete Research, Vol.19, No.60, 1967, S.157-164
  
- /4/ ARTHANARI, S.; YU, C.W.  
Creep of concrete under uniaxial and biaxial stresses at elevated temperatures  
Mag. of Concrete Research, Vol.19, No.60, 1967, S.149-156
  
- /5/ ASCHL, H.  
Mechanische Eigenschaften von Massengbeton unter erhöhten Temperaturen  
Veröff. des Lehrstuhls für Massivbau, TU München, 1977
  
- /6/ ASCHL, H.; LINSE, D.; STOECKL, S.  
Kriechen von Beton bei mehrachsiger Beanspruchung und bei erhöhten Temperaturen  
DAfStb, Spannbeton-Reaktor-Druckbehälter, Vortragsband Nr.3, 1975
  
- /7/ ASCHL, H.; STOECKL, S.  
Wärmeausdehnung, Elastizitätsmodul, Schwinden, Kriechen und Restfestigkeit von Reaktorbeton unter einachsiger Belastung und erhöhten Temperaturen  
DAfStb, Heft 324, 1981
  
- /8/ BAZANT, Z.P.  
Zuschrift zu: On the applicability of modified Dischinger equations; von L.F.NIELSEN  
Cement and Concrete Research, Vol.8, 1978
  
- /9/ BAZANT, Z.P.  
Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method  
Journal of the ACI, 1972

- /10/ BAZANT,Z.P. ; OSMAN,E.  
Discussion: On the choice of creep function for standard  
recommendations on practical analysis of structures  
Cement and Concrete Research, Vol.5, 1975, S.129-138
  
- /11/ BAZANT,Z.P. ; PANULA,L.  
Practical prediction of time dependent deformations of  
concrete (Teil 1-6)  
Materiaux et Constructions, Vol.11, No.65, S.317-328,  
Vol.11, No.66, S.415-434; Vol.12, No.69, S.175-183
  
- /12/ BENETT,E.W. ; LOAT,D.R.  
Shrinkage and creep of concrete as affected by the finnes  
of portland cement  
Mag. of Concrete Research, 1970
  
- /13/ BROWNE,R.D. ; BLUNDELL,R.  
The influence of loading age and temperature on the long-  
term creep behavior of concrete in a sealed, moisture  
stable, state  
Materiaux et Constructions, Vol.2, No.8, 1969, S.133-143
  
- /14/ BROWNE,R.D. ; BLUNDELL,R.  
The behaviour of concrete in prestressed concrete  
pressure vessels  
Nuc. Eng. and Design, 20, 1972, S.429-475
  
- /15/ CHUANG,J.W. ; KENNEDY,T.W.; PERRY,E.S ; NEILS,T.  
Prediction of multiaxial creep from uniaxial creep tests  
ACI-SEM. on Concrete Reactors, Berlin, 1970
  
- /16/ EIBL,J. ; WAUBKE,N.V. ; KLINGSCH,W. ; SCHNEIDER,U.  
Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im  
Reaktordruckbehaelterbau  
DAfStb, Heft 237, 1974
  
- /17/ ENGLAND,G.L.  
Steady-state stresses in concrete structures subjected to  
sustained temperatures and loads  
Nuc. Eng. and Design, Heft 3, 1966, S.54-65, S.246-255
  
- /18/ ENGLAND,G.L.; ROSS,A.D.  
Reinforced concrete under thermal gradients  
Mag. of Concrete Research, Vol.14, No.40, 1962, S.5-12,

- /19/ FAHMI, H.M.; BRESLER, B.; POLIVKA, M.  
Prediction of creep of concrete at variable temperatures  
Journal of the ACI, 1973, S.709-713
  
- /20/ FAHMI, H.M.; POLIVKA, M.; BRESLER, B.  
Effect of sustained and cyclic elevated temperature on  
creep of concrete  
Cement and Concrete Research, Vol.2, 1972, S.591-606
  
- /21/ FISCHER, R.  
Ueber das Verhalten von Zementmoertel und Beton bei hoeheren  
Temperaturen  
DAfStb, Heft 214, 1970
  
- /22/ GEYMEYER, H.  
Zum Einfluss erhoelter Temperaturen auf das Formaenderungs-  
verhalten von Beton  
Sonderdruck aus Zement und Beton, Wien, Heft 63/64, 1972
  
- /23/ GEYMEYER, H.  
Effect of temperature on creep of concrete  
ACI, SP-34, 1970, S.565-633
  
- /24/ GEYMEYER, H.  
Kriechversuche bei 120 Grad C und Raumtemperatur, sowie ueber  
die Ermittlung der Waermedehnzahl an Betonproben unter ver-  
schiedenen Versuchsbedingungen  
TU Graz, unveroeffentlichter Versuchsbericht, 1976, S.1-12
  
- /25/ GHOSH, R.S.; TIMUSK, J.  
Creep of fly ash concrete  
Journal of the ACI, 1981, S.351-357
  
- /26/ GLUCKLICH, J.; ISHAI, O.  
The effect of temperature on the deformation of hardened  
cement paste  
Rilem, Int. Symp.on Concrete in hot Conditions, Haifa, 1960
  
- /27/ HANNANT, D.J.  
Creep and creep recovery of concrete subjected to a  
multiaxial compressiv stress  
Journal of the ACI, Vol.66, 1966

- /28/ HANNANT,D.J.  
Strain behavior of concrete up to 95 grd C under  
compressive stresses  
Conference on prestressed Concrete Pressure Vessels, Inst.  
of Civ. Eng., pap.17, 1969
- /29/ HANSEN,T.C.  
Creep of concrete. The influence of variations in the  
humidity of the ambient atmosphere  
Preliminary Publication, Sixth Congress, International  
Association for Bridges and Structural Engeneering,  
Stockholm 1960, S.57-65.
- /30/ HANSEN,T.C.  
Creep and stress relaxation of concrete. A theoretical and  
experimental investigation  
K. Techniska Hoegskolan 31, Stockholm, 1960
- /31/ HANSEN,T.C. ; ERIKSSON,L.  
Temperature change effect on behavior of cement paste,  
mortar and concrete under load  
Journal of the ACI, 1966, S.489-502
- /32/ HANSSON,V.  
Werkstoffannahmen zum Kriechen und Schwinden des Betons  
in Spannbeton-Reaktordruckbehaeltern  
Inst. f. Konstr. Ing. Bau, Univers. Bochum, Ber. Nr.3, 1970
- /33/ HELMUTH,R.A.  
Dimensinal changes of hardened portland cement pastes  
caused by temperature changes  
Highway Research Board, Proc.40, 1961
- /34/ HICKEY,K.B.  
Creep, strength and elasticity of concrete at elevated  
temperatures  
Report No. C-1257, 1967, Bureau of Reclamation
- /35/ HUMMEL,A. ; WESCHE,K. ; BRAND,W.  
Versuche ueber das Kriechen unbewehrten Betons  
- der Einfluss der Zementart, des W/Z-Wertes und des Be-  
lastungsalters auf das Kriechen von Beton  
DAfStb, Heft 146, 1962
- /36/ HUNDT,J. ; KANTELBERG,H.  
Sorptionsuntersuchungen an Zementstein, Zementmoertel  
und Beton  
DAfStb, Heft 297

- /37/ ILLSTON, J.M.  
The components of strain in concrete under sustained  
compression stress  
Mag. of Concrete Research, Vol.17, No.50, 1965, S.21-28
- /38/ ILLSTON, J.M.; SANDERS, P.D.  
The effect of temperature change upon the creep of mortar  
under torsional loading  
Mag. of Concrete Research, Vol.25, No.84, 1973, S.136-144
- /39/ ILLSTON, J.M.; SANDERS, P.D.  
Characteristics and prediction of creep of a saturated  
mortar under variable temperature  
Mag. of Concrete Research, Vol.26, No.88, 1974
- /40/ KOMENDANT, G.J.; NICOLAYEFF, M. ; POLIVKA, M.; PIRTZ, D.  
Effect of temperature, stress level and age of loading on  
creep of sealed concrete  
ACI, SP-55 (McHenry-Symp.), 1978, S. 55-82
- /41/ LORMAN, W.R.  
The theorie of concrete creep  
Proc. of the ASTM, 1940, S.1084 ff.
- /42/ MARECHAL, J.C.  
Causes physiques et chimiques du fluage et du retrait  
du beton  
RILEM Collog. on the phys. and chem. causes of Creep and  
Shrinkage of Concrete, Muenchen, 1968
- /43/ MARECHAL, J.C.  
Le fluage du beton en fonction de la temperature  
Materiaux et Constructions, Vol.2, No.8, 1969, S.111-115
- /44/ MARECHAL, J.C.  
Fluage du beton en fonction de la temperature.  
Complements experimentaux  
Materiaux et Constructions, Vol.3, No.18, 1970, S.395-406
- /45/ MARECHAL, J.C.  
Creep of concrete as a function of temperatures  
ACI, SP-34, 1970, S.547-564
- /46/ MCDONALD, J.E.  
Creep of concrete under various temperature, moisture and  
loading conditions  
ACI, SP-55 (McHenry-Symp.), 1978, S. 31-54

- /47/ MCDONALD, J.E.  
An experimental study of multiaxial creep in concrete  
ACI, SP-34, 1970, S.735-768
- /48/ NASSER, K.W.  
Creep of concrete at low stress-strength ratios and elevated temperatures  
ACI, SP-25, 1968, S.127-147
- /49/ NASSER, K.W. ; LOHTIA, R.P.  
Creep of mass concrete at high temperatures  
Journal of the ACI, 1971, S.276-281
- /50/ NASSER, K.W. ; MARZOUK, H.M.  
Creep of concrete at temperatures from 70 F (21C) to 450 F (232 C) under atmospheric pressure  
Journal of the ACI, 1981, S. 147-150
- /51/ NASSER, K.W. ; MARZOUK, H.M.  
Properties of mass concrete containing fly ash at high temperatures  
Proc. of the ACI, Nr.4, 1979, S.537-550
- /52/ NASSER, K.W. ; NEVILLE, A.M.  
Creep of concrete at elevated temperatures  
Journal of the ACI, 1965, S.1567-1579
- /53/ NASSER, K.W. ; NEVILLE, A.M.  
Creep of old concrete at normal and elevated temperatures  
Journal of the ACI, 1967, S.97-103
- /54/ NEVILLE, A.M.  
Role of cement in the creep of mortar  
Journal of the ACI, Proc.55, 1959, S.963-984
- /55/ NEVILLE, A.M.  
Creep of concrete as a function of its cement paste content  
Mag. of Concrete Research, Vol.16, No.46, 1964, S.21-30
- /56/ NEVILLE, A.M.  
Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed  
Amsterdam, 1970
- /57/ NIELSEN, A.  
Rheologie of building materials  
National Swedish Building Research: Doc. D6, 1972

- /58/ NISHIZAWA,N.; OKAMURA,H.  
Strength and inelastic properties of concrete at elevated temperature  
ACI-SP 34, 1970, Vol.1, S.407-421
- /59/ NIYOGI,A.K. ; HSU,P.; MEYERS,B.L.  
The influence of age at time of loading on basic and drying creep  
Cement and Concrete Research, Vol.3, 1973, S.633-644
- /60/ NYAME,B.K.; ILLSTON,J.M.  
Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste  
Mag. of Concrete Research, Vol.33, No.116, 1981, S.139-146
- /61/ PARROTT,L.J.  
A study of basic creep in relation to phase changes in cement paste
- /62/ PARROTT,L.J.  
Basic creep, drying creep and shrinkage of a mature cement paste after a heat cycle  
Cement and Concrete Ass.
- /63/ PARROTT,L.J.  
Recoverable and irrecoverable deformation of heat-cured cement paste  
Mag. of Concrete Research, Vol.29, No.98, 1977, S.26-30
- /64/ PARROTT,L.J.  
A study of transitional thermal creep in hardened cement paste  
Mag. of Concrete Research, Vol.31, No.107, 1979, S.99-103
- /65/ PARROTT,L.J.  
Effect of a heat cycle during moist curing upon the deformation of hardened cement paste  
Proc. of Conf. on Hydraulic Cement Pastes, Sheffield, 1976, S.189-203
- /66/ PESCHEL,G.  
The viscosity of thin water films between two quartz glass plates  
Materials and Structures, Vol.1, No.6, 1968, S.529-534



- /67/ PIHLAJAARA,S.E.  
A review of some of the main results of a research on the aging phenomena of concrete: Effect of moisture conditions on strength, shrinkage and creep on mature concrete  
Cement and Concrete Research, Vol.4, 1974, S.761-771
- /68/ PROBST,P. ; STOECKL,S.  
Kriechen und Rueckkriechen von Beton nach langer Lasteinwirkung  
DAfStb, Heft 295, 1978
- /69/ POWERS,T.C.  
The thermodynamics of volume change and creep  
Materiaux et Constructions, Vol.1, No.6, 1968, S.487-507
- /70/ ROSTASY,F.S.; BUDELMANN,H.  
Untersuchung des Baustoffverhaltens bei hoher Temperatur und Feuchte  
Untersuchungsbericht, TU Braunschweig, 1981
- /71/ ROSTASY,F.S.; TEICHEN,K.-TH.  
Einfluss von Trasszusatz auf das Dauerstandverhalten von Normalbeton  
Sonderdruck aus Beton, 1970, Heft 4, S.141-145, Heft 5, S.189-191
- /72/ ROSS,A.D.  
Concrete creep data  
The Structural Eng., London, Vol.15, No.8, 1937
- /73/ RUESCH,H. ; JUNGWIRTH,D.; HILSDORF,H.K.  
Kritische Sichtung der Verfahren zur Beruecksichtigung der Einfluesse von Kriechen und Schwinden des Betons auf das Verhalten der Tragwerke  
Sonderdruck aus Beton- und Stahlbetonbau ,Heft 3,4,6, 1973
- /74/ RUETZ,W.  
Das Kriechen des Zementsteins im Beton und seine Beeinflussung durch gleichzeitiges Schwinden  
DAfStb, Heft 183, 1966
- /75/ SANDERS,P.D.  
The effect of temperatur change on the creep of mortar under torsional loading  
Dissertation, London, 1973

- /76/ SCHNEIDER,U.  
Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von  
Beton unter hohen Temperaturen  
Habilitation, TU Braunschweig, 1979
  
- /77/ SCHNEIDER,U.  
Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton unter  
stationaerer und instationaerer Temperaturbeanspruchung  
Die Bautechnik, Heft 4, 1977, S.123-132
  
- /78/ SCHNEIDER,U.  
Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen  
DAfStb Heft 337, 1982
  
- /79/ SCHNEIDER,U.; DIEDERICH,S,U. ; ROSENBERGER,W.; WEISS,R.  
Hochtemperaturverhalten von Festbeton  
Arbeitsbericht 1978-1980 des SFB 148, Brandverhalten von  
Bauteilen, Teilprojekt B3, TU Braunschweig, 1980
  
- /80/ SEEBERGER,J.  
Festigkeitsverhalten und Strukturaenderungen von Beton  
bei Temperaturbeanspruchung bis 250 Grd. C  
Dissertation, Univ. Karlsruhe, 1981
  
- /81/ SEKI,S. ; KAWASUMI,M.  
Creep of concrete at elevated temperatures  
ACI, SP-34, 1970, S.591-637
  
- /82/ SERAFIM,J.L.; GUERREIRO,M.Q.  
Influence of temperature on the creep of mass concrete  
Bulletin RILEM, No.6, 1960, S.23-32
  
- /83/ SILVEIRA DA,A.F.; FLORENTINO,C.A.  
Influence of temperature on the creep of mass concrete  
ACI, SP-25, 1968, S.173-189
  
- /84/ STECK,E.  
Zur Beruecksichtigung des Betonkriechens bei der Berechnung  
von Reaktordruckbehaeltern
  
- /85/ THELANDERSSON,S.  
Mechanical behavior of concrete under torsional loading at  
transient, high temperature conditions  
Lund Inst. of Techn., Bulletin 46, 1974

- /86/ TROXELL,G.E.; RAPHAEL,J.M.; DAVIS,R.E.  
Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced  
concrete  
Proceeding ASTM, Vol.58, 1958, S.1101-1120
- /87/ WAGNER,O.  
Das Kriechen unbewehrten Betons  
DAfStb, Heft 131, 1958
- /88/ WALLO,E.W.; YUAN,R.L. ; LOTT,J.L. ; KESLER,C.E.  
Sixth progress report: Prediction of creep in structural  
concrete from short-time-tests  
University of Illinois, Rep. 658, 1965
- /89/ WESCHE,K. ; WEBER,J.W.; BASTGEN,K.J.  
RILEM Collog. " Creep of Concrete ", Leeds, 1978
- /90/ WITTMANN,F. ; ZAITSEV,J.  
Verformung und Bruchvorgang poroeser Baustoffe bei kurz-  
zeitiger Belastung und Dauerlast  
DAfStb, Heft 232, 1974
- /91/ WOELFEL,R.  
Kriechen von austrocknungsbehindertem Beton bei  
erhoehten Temperaturen  
Bauplanung-Bautechnik, 34 Jg., Heft 12, 1980, S.565-567